

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

MAPOVÁNÍ GEOMETRICKÝCH CHYB V PRACOVNÍM PROSTORU OBRÁBĚCÍHO STROJE

MAPPING GEOMETRY ERRORS IN THE MACHINE TOOL WORKSPACE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JOSEF KNOBLOCH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL HOLUB

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Josef Knobloch

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní systémy (2301T030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Mapování geometrických chyb v pracovním prostoru obráběcího stroje

v anglickém jazyce:

Mapping geometry errors in the machine tool workspace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro vybrané obráběcí stroje popsat pohyb nástroje a obrobku v jeho pracovním prostoru. Cílem je tedy popsat prostorový pohyb nástroje vůči obrobku s příslušnou vizualizací a možností zanesení geometrických chyb do daného modelu.

Cíle diplomové práce:

- Rozbor a specifikace úlohy
- kinematické rozbor pro vybrané stroje, zpracování vizualizace.
- Popis geometrických chyb u OS
- Výsledný model včetně geometrických chyb

Seznam odborné literatury:

- www.infozdoje.cz
- Grepl, Robert. Kinematika a dynamika mechatronických systémů. 2007, první, CERM, Brno.
- WECK, Manfred, BRECHER, Christian. Werkzeugmaschinen : Konstruktion und Berechnung. 2006. überarb. Auflage. Verlag Berlin Heidelberg : Springer, 2006. 701 s. ISBN 3-540-22502-1.
- Marek, Jiří, MM Průmyslové spektrum: Konstrukce CNC obráběcích strojů. 2006. Speciální vydání. Dostupný z WWW: <www.mmspektrum.com>. ISSN 1212-2572.
- BORSKÝ, Václav. Základy stavby obráběcích strojů. 1. vyd. [s.l.] : [s.n.], 1986. 145 s. ISBN 55-600-86.
- DEMEČ, Peter. Presnosť obrábacích strojov a jej matematické modelovanie. Košice: Viena Košice, 2001. 140 s. ISBN 80-7099-620-X.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Holub

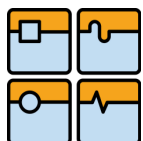
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 30.11.2010



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 1
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Abstrakt

Bc. Josef Knobloch

Mapování geometrických chyb v pracovním prostoru obráběcího stroje

Diplomová práce, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2011.

Diplomová práce má za cíl navrhnout metodu zjišťování geometrické přesnosti obráběcích strojů s pomocí laser trackeru. V práci je navrhnut postup měření a jsou vyhotoveny programy v jazyku Matlab pro zpracování. Metoda umožňuje stanovit přesnost polohování jednotlivých os a jejich natočení a matematický popis pracovního prostoru. Na závěr jsou stanoveny geometrické parametry virtuálního obrobku a je navrhnut postup při ověřování platnosti navržených postupů.

Klíčová slova: laser tracker, geometrická přesnost, matematický model geometrických chyb

Abstract

Bc. Josef Knobloch

Mapping geometry errors in the machine tool workspace

Diploma thesis offers a new approach to the measuring of geometry errors in the machine tool workspace with the aid of laser tracker. There is a method of data acquisition and also the Matlab programs for data processing suggested in the thesis. This method can determine the accuracy and repeatability of positioning and angular displacement of the numerical controlled axes of the measured machine tool and it compiles its mathematical model. All the gathered knowledge is used to evaluation of geometric accuracy of the virtual machined workpiece.

Key words: laser tracker, geometric accuracy, mathematical model of geometric error



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Michala Holuba a s využitím zdrojů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne 20. 5. 2011

.....
Bc. Josef Knobloch

Poděkování

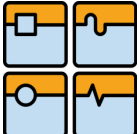
Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu této práce, Ing. Michalu Holubovi, za jeho čas věnovaný konzultacím a metodickému vedení, které vedlo k sepsání této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Milanu Škařupovi ze společnosti TOSHULIN a.s. za velice cenné rady a za pomoc při měření.

Bibliografická citace práce

KNOBLOCH, J. Mapování geometrických chyb v pracovním prostoru obráběcího stroje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Holub.

Obsah

1	Úvod	5
1.1	Cíl diplomové práce	5
1.2	Problemstellung und Zielsetzung	6
2	Přesnost obráběcích strojů	7
2.1	Geometrické chyby pracovního prostoru obráběcího stroje	7
2.1.1	Pohyb v ose	8
2.1.2	Pohyb ve více osách	9
2.2	Vybrané způsoby měření geometrických nepřesností	11
2.2.1	Laserinterferometr	11
2.2.2	Laser tracker	14
2.3	Současné využití laser trackeru v oblasti obráběcích strojů	16
2.4	Základy regresní analýzy	17
3	Metoda měření	19
3.1	Popis měřeného stroje	20
3.2	Zkušební stand	21
3.3	Volba souřadného systému	22
3.4	Plán měřených bodů	22
3.5	Průběh a výsledky neúspěšného měření	27
3.6	Měření rovinnosti upevňovací desky	28
3.7	Vytvoření umělých dat	29
4	Zpracování naměřených dat	33
4.1	Stanovení přesnosti polohování dle ISO 230-2	34
4.2	Příprava matematického popisu pracovního prostoru	38
4.2.1	Přímý přístup k odvození trajektorie nástroje v souřadném systému obrobku	39
4.2.2	Inverzní přístup – stanovení natočení os a sestavení matematického popisu pracovního prostoru	41
4.3	Stanovení vlivu chyby stolu na 3D síť	44
5	Zkušební obrobek	47
5.1	Geometrická přesnost obrobku a způsoby měření	47
5.2	Vytvoření virtuálního obrobku	49
5.3	Vyhodnocení geometrických parametrů	53
5.3.1	Rovinnost	53
5.3.2	Rovnoběžnost	55
5.3.3	Tolerance kolmosti	56
5.4	Porovnání výsledků	57
5.5	Zkoušky prováděné na zkušebních obrocích	59
5.5.1	Podmínky při měření	59
5.5.2	Zkušební obrobek	60
6	Shrnutí, zobecnění a přínos práce	61
6.1	Shrnutí	61
6.2	Zobecnění použité metody na další typy strojů	62
6.3	Přínos práce	63
6.4	Zusammenfassung	64
	Příloha A Programy	69
	Příloha B Návrh zkušebního obrobku	77
	Seznam obrázků	78
	Seznam tabulek	79
	Seznam citací	80

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

1 Úvod

S rostoucí technickou úrovní vyráběných strojních zařízení rostou i nároky na přesnost a kvalitu povrchu jejich součástí. Proces obrábění je obecně spojen s chybami, které mohou mít původ v mnoha příčinách, a které mají rozhodující vliv na výslednou přesnost dle požadovaných parametrů. Identifikace zdrojů nepřesností a jejich kvantifikace jsou nezbytnými kroky k odstranění nebo alespoň minimalizaci jejich vlivu na kvalitu obráběcího procesu. Výrobci strojů hledají nové způsoby a možnosti proměřování jejich vlastních strojů, které slouží jako zpětná vazba od hotového stroje zpět k návrhu konstrukce. Na druhé straně chtějí mít uživatelé přehled o zakoupených strojích, jejich přesnosti a tedy o jejich výrobních schopnostech.

Měřením geometrické přesnosti obráběcích strojů se zabývá norma ISO 230 *Zásady zkoušek obráběcích strojů* a konkrétně část 1: *Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění* a část 2: *Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách*. Postup, který používá laser tracker k měření přesnosti výrobních strojů, dosud není předmětem žádné normy a ani nebyl veřejně publikován. Byl zatím používán pouze k méně přesnému, zato rychlému proměření velkých dílců, kde by použití jiných měřidel bylo komplikované.

Podnět pro vznik této práce dala společnost TOSHULIN a.s. v zastoupení jejího technického ředitele, prof. Jiřího Marka. Společnost zapůjčila obráběcí stroj a laser tracker API T3, který používá převážně k proměřování rozměrných obrobků a ustavování obráběcích strojů. Tento laser tracker nedosahuje potřebné přesnosti k měření obráběcích strojů, ale Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky v době vzniku práce počítal se zakoupením přesnějšího zařízení, u kterého by možnost použití na obráběcí stroje připadala v úvahu. Navrhnutý způsob měření, postup zpracování a závěry získané z této práce budou využitelné i pro toto přesnější zařízení. Samotné zadání bylo sestaveno tak, že význam této diplomové práce bude právě v navrhnutém způsobu měření a následně i ve zpracování dat.

V práci je navrhnutý postup měření a způsob vyhodnocení výsledků, pro jehož ověření byl zajištěn ve společnosti TOSHULIN stroj i laser tracker. Měření ale nebylo v požadované formě provedeno a získaná data nenašla uplatnění v práci. Bez možnosti aplikovat navrhnuté programy zůstala navrhnutá metoda neověřena. V práci jsou tedy dle navrženého způsobu měření vytvořena umělá data, na nichž je zpracování demonstrováno. Na závěr je navržen způsob ověření na reálném stroji a bude otázkou další práce v tomto tématu porovnat výsledky metody s navrhnutým měřením.

1.1 Cíl diplomové práce

Snahou této práce bude sestavit metodu, která bude využívat laser tracker k mapování geometrických chyb v pracovním prostoru obráběcího stroje a dále navrhnout způsoby jejího vyhodnocení. Konkrétním výstupem má být ve zmapovaném pracovním prostoru opracování virtuálního obrobku a stanovení jeho geometrických parametrů. Cílem nebude z konkrétních výsledků vyvozovat závěry o přesnosti měřeného stroje, pouze o vhodnosti postupů k získání naměřených dat, způsobů vyhodnocování výsledků a použitelnosti laser trackeru obecně.



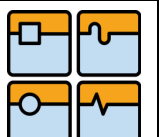
1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Die sich stetig erhöhenden Anforderung an die Genauigkeit von Produkten setzt ein verbessertes geometrisches Verhalten einer Werkzeugmaschine voraus, da dadurch die Toleranzen des herzustellenden Produktes maßgeblich bestimmt wird. Die Genauigkeit einer Werkzeugmaschine wird im Allgemeinen nach den Normen beurteilt. Mit der Messung von geometrischem Verhalten befasst sich die internationale Norm ISO 230 *Prüfregeln für Werkzeugmaschinen* und konkret Teil 1: *Geometrische Genauigkeit von Maschinen, die ohne Last oder unter Schlichtbedingungen arbeiten* und Teil 2: *Bestimmung der Positioniergenauigkeit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen*. Die Diplomarbeit *Erfassung der geometrischen Fehler im Arbeitsraum einer Werkzeugmaschine* beschäftigt sich mit der Messung einer Werkzeugmaschine mithilfe eines Lasertrackers und auch mit der Möglichkeit, die geometrischen Toleranzen der herzustellenden Werkstücke vorauszusagen. Methode, die zur Messung des geometrischen Verhaltens einen Lasertracker einsetzt, wurde bislang noch nie in einem Artikel oder einer Norm veröffentlicht.

Die Veranlassung für Entstehung dieser Aufgabenstellung gab der Welthersteller von Karusseldrehmaschinen TOSHULIN, der einen Lasertracker besitzt. Ein Lasertracker ist ein Messgerät, das durch eine Kombination aus Winkelmessung und interferometrischer Laser-Distanzmessung die 3D-Punktkoordinaten eines Objekts erfasst. Es wurde beim Hersteller bisher nur zur Messung von großen Werkstücken und zur Gründung von Werkzeugmaschinen genutzt. Die bisher niedrige Messgenauigkeit von Lasertracker erhöht sich ständig und es kommt in Betracht, sie auch für die Messung von Werkzeugmaschinen einzusetzen.

Gegenüber derzeit meist eingesetzten Laserinterferometern, die eine Koordinate bestimmen können, Lasertracker messen nicht nur Abstand eines Reflektors, sondern auch übrige zwei Raumkoordinaten. Das bietet weitere Möglichkeiten als übliche geometrische Messung.

Für Bedarf der Diplomarbeit wurde das Bearbeitungszentrum ohne rotierende Achse ausgewählt. Das Ziel der in der Arbeit vorgeschlagenen Messung ist es, der Arbeitsraum der Werkzeugmaschine mit einem Lasertracker durchzumessen und eine Methode aufzustellen, die anhand der Ergebnisse die geometrischen Toleranzen eines gedachten (virtuellen) im Arbeitsraum bearbeiteten Werkstückes bestimmen soll.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

2 Přesnost obráběcích strojů

Proces obrábění je ve své podstatě velice komplexní jev a existuje mnoho veličin, které ho ovlivňují a určují jeho výslednou přesnost. Jelikož není možné vzniklé chyby úplně eliminovat, je třeba je alespoň udržet v určitých mezích, tzv. tolerancích. Důležité je rozlišovat mezi chybami náhodnými a systémovými. Náhodné chyby vznikají kombinací více faktorů a mají Gaussovo normální rozložení. Systémové chyby posouvají střed rozložení jedním nebo druhým směrem. Právě do této kategorie patří i chyby geometrické (1). Faktory ovlivňující výslednou přesnost obrobků se dají shrnout do těchto čtyř skupin (2):

- chyby geometrie použitého nástroje,
- chyby zapříčiněné použitou technologií (otěr či naopak nárůstka na břit nástroje),
- deformace nástroje, obrobku, upínacích prvků apod.,
- odchylky při relativním pohybu mezi nástrojem a obrobkem, tedy chyby lineárního a rotačního pohybu a do této kategorie jsou zahrnuty i deformace struktury stroje vlivem zatížení.

Pouze poslední kategorie je ovlivnitelná vlastním návrhem stroje. Velký vliv v ní má zatížení stroje. Ve formě statických sil pocházejících z vlastní váhy se může na celkové chybě stroje podílet hmotnost obrobku i procesní síly. Zrychlení pohybujících se hmot zatěžuje stroj dynamicky. Mění se procesní síly (např. změny tloušťky ubírané třísky při frézování) a samobuzené kmitání ovlivňují velikost deformace stroje v závislosti na jeho dynamické poddajnosti (2).

K nezanedbatelným deformacím vede zvlášť při vysokém teplotním gradientu také oteplení stroje. Vnitřním zdrojem tepla se stává technologický proces nebo ty části stroje, kde dochází ke ztrátám (ložiska, vedení, kuličkový šroub, elektrické a hydraulické pohony). Mezi vnější zdroje tepla patří např. okolní vzduch či sluneční záření (2).

Poslední hlavní složkou chyb v této kategorii jsou chyby vznikající bez jakéhokoli zatížení. Patří mezi ně chyby geometrické, do kterých patří odchylky tvaru a polohy funkčních částí stroje a které se tedy týkají pouze jednoho prvku (stůl, support, saně, ...). Dále se rozlišují i chyby kinematické, jež vznikají vzájemným pohybem dvou a více dílů stroje. I tyto mají původ v chybné geometrii a proto se budou v práci zahrnovat souhrnně pod geometrické chyby.

2.1 Geometrické chyby pracovního prostoru obráběcího stroje

Všechny pohybové osy se podílí na celkové chybě. Pro každou osu existují 3 chyby translační a tři chyby rotační. Obráběcí proces třísového obráběcího stroje ovlivňuje tedy 21 různých chyb (6 chyb pro každou osu a navíc 3 chyby kolmosti pro roviny XY, XZ a YZ).

Geometrické chyby mohou vznikat (3):

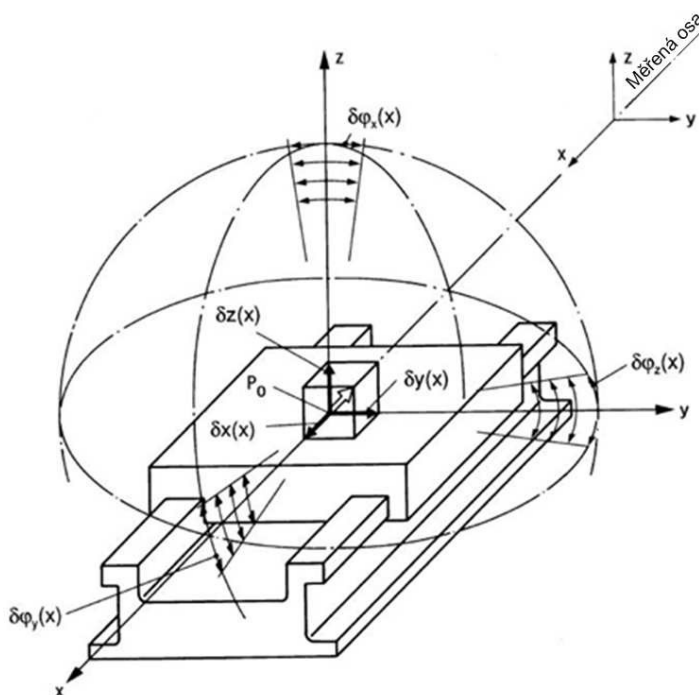
- nepřesným opracováním funkčních ploch (lišty vedení, ložiska),
- opotřebením,
- nesprávnou montáží,
- chybami vzniklými v CNC řízení,



– špatným ustavením a seřízením stroje.

2.1.1 Pohyb v ose

Na obrázku je znázorněn příklad lineární osy x . Geometrická odchylka v každém bodě této osy se může popsat, odpovídá počtu stupňů volnosti, šesti údajům. Pro jakýkoli bod P_0 ležící na ose existují tři translační odchylky $\delta x(x)$, $\delta y(x)$ a $\delta z(x)$ v ortogonálních směrech x , y a z . Bude-li brán vztah mezi libovolným bodem P_i , který vznikl pohybem z bodu P_0 , vzniknou navíc tři chyby úhlové $\delta \varphi_x(x)$, $\delta \varphi_y(x)$ a $\delta \varphi_z(x)$ (v angličtině „roll“, „pitch“ a „yaw“) (2).



Obr. 2.1: Tři translační a tři rotační chyby při pohybu v lineární ose (2)

Výsledná odchylka $\{a\}_{(X_0, X_W)}$ libovolného bodu obrobku P_i v referenčních souřadnicích stroje bude:

$$\{a\}_{(X_0, X_W)} = \{a_T\}_{(X_0)} + [A_z]_{(X_0)} \cdot \{X_W\} \quad (2.1)$$

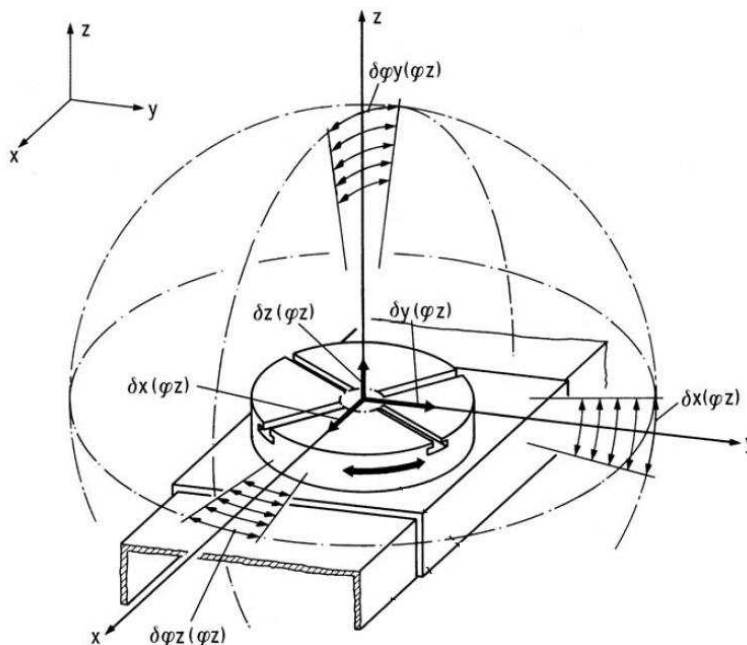
kde X_0 značí souřadný systém stroje a X_W polohu bodu P_i v souřadném systému obrobku. Člen $\{a_T\}_{(X_0)}$ je vektor translačních chyb počátku souřadného systému obrobku P_0 . K těmto translačním odchylkám jsou přičteny odchylky vzniklé úhlovým natočením. Ty se získají vynásobením transformační matice úhlových odchylek $[A_z]_{(X_0)}$ s polohovým vektorem X_W bodu P_i . Za předpokladu, že úhlové odchylky $\delta \varphi_x(x)$, $\delta \varphi_y(x)$ a $\delta \varphi_z(x)$ jsou malé a v radiánech, může být v transformační matici (viz např. (3)) sinus úhlu nahrazen úhlem samotným a kosinus hodnotou 1 (2). Rovnice (2.1) pak bude vypadat:

$$\begin{Bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{Bmatrix}_{(X_0, X_W)} = \begin{Bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{Bmatrix}_{(X_0)} + \begin{bmatrix} 0 & -\delta \varphi_z & \delta \varphi_y \\ \delta \varphi_z & 0 & -\delta \varphi_x \\ -\delta \varphi_y & \delta \varphi_x & 0 \end{bmatrix}_{(X_0)} \cdot \begin{Bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

Podobně jako pro translační osu existuje i pro rotační osu šest odchylek (Obr. 2.2). Pohybovou osu tvoří v tomto případě rotační osa φ_z . Translační odchylka $\delta z(\varphi_z)$



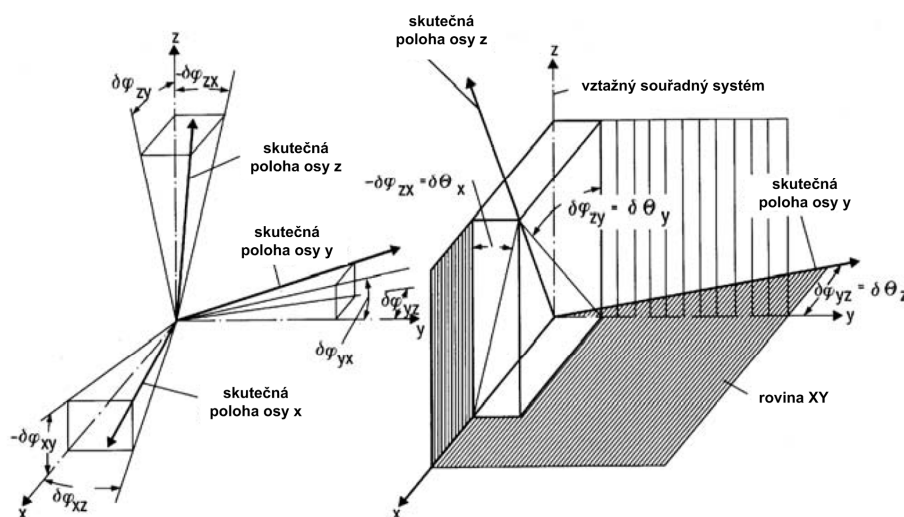
tvoří axiální pohyb, odchylky $\delta x(\varphi_z)$ a $\delta y(\varphi_z)$ způsobují excentricitu rotačního pohybu. Naklápění rotační osy φ_z ve směrech os x a y je označeno $\delta\varphi_x(\varphi_z)$, resp. $\delta\varphi_y(\varphi_z)$. $\delta\varphi_z(\varphi_z)$, a způsobuje chybu v polohování.



Obr. 2.2: Tři translační a tři rotační chyby při pohybu v rotační ose (2)

2.1.2 Pohyb ve více osách

K výše popsaným úchytkám přibývají navíc odchylky, které vznikají vzájemnou polohou os. Dle obrázku (Obr. 2.3) popisují úhly $\delta\varphi_{xy}$, $\delta\varphi_{xz}$ úhlové odchylky osy x a úhly $\delta\varphi_{yx}$, $\delta\varphi_{yz}$, resp. $\delta\varphi_{zx}$, $\delta\varphi_{zy}$, odchylku osy y , resp. z .



Obr. 2.3: Vzájemné odchylky mezi osami (2)

Odchylka bodu v prostoru je vlivem úhlových odchylek přímo úměrná jeho vzdálenosti v souřadném systému stroje:

$$\{a_{z0}\}_{(X_0)} = [A_{z0}] \cdot \{X_0\}, \quad (2.3)$$



$[A_{\angle 0}]$ je matice vzájemných úhlových odchylek a X_0 polohový vektor bodu v souřadném systému stroje. Rozepsána vypadá rovnice (2.3) následovně:

$$\begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{Bmatrix}_{(\angle 0, X_0)} = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\varphi_{yz} & \delta\varphi_{zy} \\ \delta\varphi_{xz} & 0 & -\delta\varphi_{zx} \\ -\delta\varphi_{xy} & \delta\varphi_{yz} & 0 \end{bmatrix}_{(X_0)} \cdot \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

Na obrázku (Obr. 2.3) je znázorněn případ, kdy je za vztažnou osu vzata osa x a za vztažnou rovinu rovina XY . Je zřejmé, že odchylky jsou nezávislé na ose x a odchylky vzniklé v ose z mohou být uvažovány nulové. Tímto se zjednoduší rovnice (2.4) na tvar:

$$\begin{Bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{Bmatrix}_{(\angle 0, X_0)} = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\varphi_{yz} & \delta\varphi_{zy} \\ 0 & 0 & -\delta\varphi_{zx} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(X_0)} \cdot \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

Složením rovnic (2.1) a (2.3) vznikne celková odchylka bodu P při pohybu ve třech osách v poloze X_0 .

$$\{a\}_{(X_0, X_W)} = \{a_T\}_{(X_0)} + [A_{\angle}]_{(X_0)} \cdot \{X_W\} + [A_{\angle 0}] \cdot \{X_0\} \quad (2.6)$$

Vektor translačních chyb $\{a\}$ a matice úhlových odchylek $[A_{\angle}]$, resp. $[A_{\angle 0}]$, jsou určovány pro diskrétní body pracovního prostoru. K popisu chování celého prostoru se nabízí prostor zdiskretizovat do sítě měřených bodů, což bude provedeno i v této práci.

Jelikož je tento postup náročný na počet měření a jejich následné zpracování, existuje někdy možnost jednotlivé pohybové osy proměřit zvlášť. K určení výsledné chyby je pak použit princip superpozice. Vše platí pouze za předpokladu, že chyby os jsou vzájemně nezávislé. Tento předpoklad je nutno nejprve ověřit měřeními a je-li splněn, je použita rovnice:

$$\{a\}_{(X_0, X_W)} = [\{a_T\}_{(x_0)} + \{a_T\}_{(y_0)} + \{a_T\}_{(z_0)}] + [[A_{\angle}]_{(x_0)} + [A_{\angle}]_{(y_0)} + [A_{\angle}]_{(z_0)}] \cdot \{X_W\} + [A_{\angle 0}] \cdot \{X_0\} \quad (2.7)$$

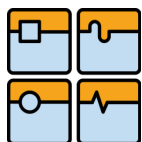
Výslednou přesnost určuje vzájemná odchylka nástroje a obrobku. Nejprve jsou stanoveny odchylky obrobku, resp. nástroje, z chyb jednotlivých os a posléze jsou obě od sebe odečteny.

$$\{a\}_{(X_0, X_W)} = [\{a\}_{(x_0, X_W)} + \{a\}_{(z_0, X_W)}] - [\{a\}_{(y_0, X_W)} + \{a\}_{(w_0, X_W)}] \quad (2.8)$$

Předpoklad, že chování jednotlivých pohybových os je na sobě nezávislé, ve většině případů neplatí. Tento fakt je způsoben tím, že např. odchylka osy vlivem gravitačního zatížení je závislá na vysunutí osy, a pak je v těchto případech nutné měřit chyby os v různých konfiguracích vzhledem k ostatním. Vytvořením sítě bodů je toto zajištěno. Použijí-li se odchylky závislé na poloze ke zbylým osám, změní se tvar rovnice (2.7) na následující:

$$\{a\}_{(X_0, X_W)} = \{a\}_{(x_0(y_0, z_0); X_W)} + \{a\}_{(y_0(x_0, z_0); X_W)} + \{a\}_{(z_0(x_0, y_0); X_W)} \quad (2.9)$$

Výsledek rovnice (2.9) platí pouze pro jeden konkrétní případ zatížení. Ve skutečnosti je třeba k získání kompletní představy o chování stroje provést měření při různých způsobech zatížení. Cíl této diplomové práce je stanovit pouze geometrické chyby, proto bylo navrženo měření jedno, a to bez zatížení.

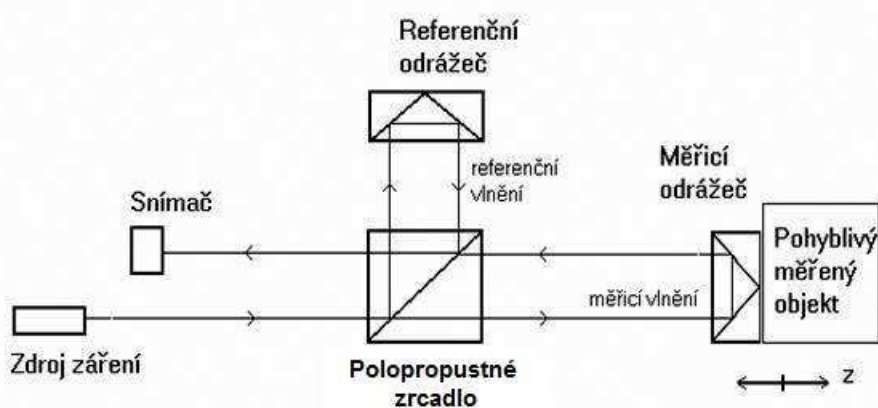


2.2 Vybrané způsoby měření geometrických nepřesností

2.2.1 Laserinterferometr

V současnosti se k měření obráběcích strojů používá díky vysokému rozlišení a spolehlivosti nejčastěji laserinterferometr.

Laserinterferometr využívá vlastností laserového paprsku, a to monochromatickosti a koherence (paprsek obsahuje světlo pouze jedné vlnové délky a bez fázového posunutí).



Obr. 2.4: Schéma laserinterferometru (4)

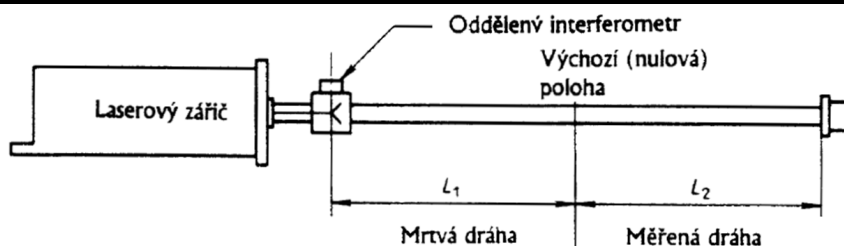
Jako první jej v roce 1890 vynalezl Michelson a jeho princip se bez větších změn používá dodnes. Zdroj záření vyše monochromatický koherentní paprsek na polopropustné zrcadlo, kde je rozdělen na dvě části. První část směřuje k pevnému referenčnímu odražeči, druhá dopadá na zrcadlo umístěné na měřeném objektu. Obě odražené části paprsku spolu interferují ve snímači. Bude-li se měřený objekt pohybovat, vzniknou zesílení a zeslabení paprsku tak, jak se vlny budou překrývat. Na výstupu fotodiody ve snímači vznikne signál se sinusovým průběhem, jehož perioda odpovídá vlnové délce laseru a posunutí objektu.

Přesnost interferometru je daná jeho vlnovou délkou, ale je ovlivňována i mnoha jinými faktory (4):

- Prostředí: Uvádí se, že změna teploty prostředí o 1 °C, tlaku o 2,5 mmHg nebo relativní vlhkosti o 30 % představuje chybu 1 μm. Vzniklé chyby lze kompenzovat, pokud je stav prostředí před začátkem měření určen a v průběhu se nemění.
- Teplota povrchu stroje: Kuličkový šroub, který pohybuje saněmi, má součinitel teplotní roztažnosti $1,08 \cdot 10^{-5} \cdot K^{-1}$ a to znamená pro dráhu 1 000 mm již patrnou změnu délky o $0,0108 \text{ mm} \cdot K^{-1}$.
- Chyba „mrtvé dráhy“: Chyba „mrtvé dráhy“ je spojena se změnou stavu prostředí a souvisí tedy přímo s prvně jmenovaným faktorem. Oblast mrtvé dráhy je vzdálenost mezi interferometrem a výchozím bodem. Dochází-li ke změně prostředí, mění se i vlnová délka. Měřicí systém laserinterferometru z korekční hodnoty pro nové prostředí vychází ale pouze z pro něj známé vzdálenosti L_2 , ne ze skutečné $L_1 + L_2$.

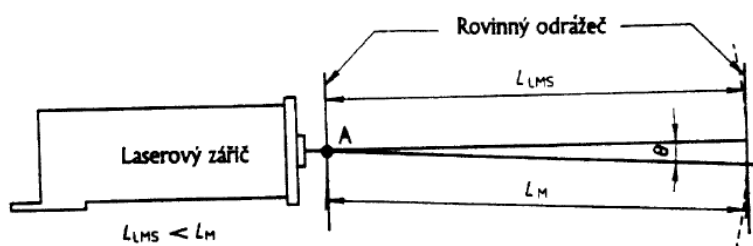


DIPLOMOVÁ PRÁCE



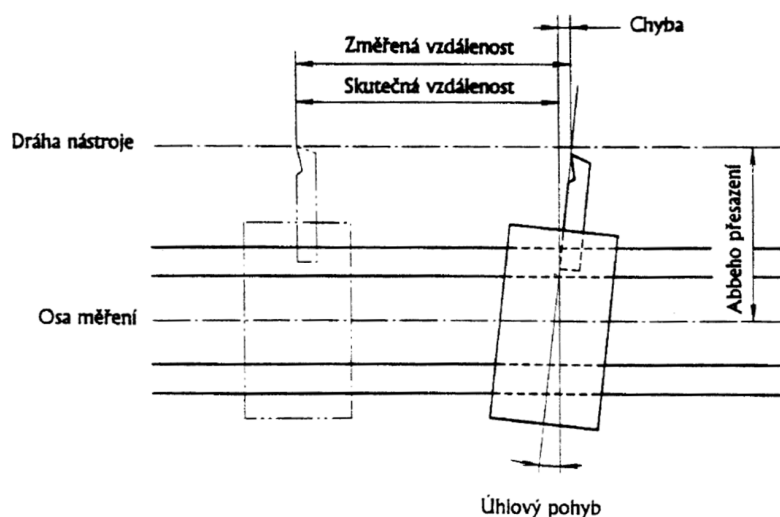
Obr. 2.5: Chyba mrtvé dráhy (4)

- Kosinová chyba: Vzniká při nerovnoběžnosti dráhy paprsku laseru vůči ose pohybu a je úměrná kosinu úhlu odchylky. Měřená dráha je pak kratší než skutečná.



Obr. 2.6: Kosinová chyba (4)

- Abbeho chyba: Je-li osa měření přesazena od osy, která má být ve skutečnosti měřena, vzniká při úhlovém natočení Abbeho chyba (viz Obr. 2.7).

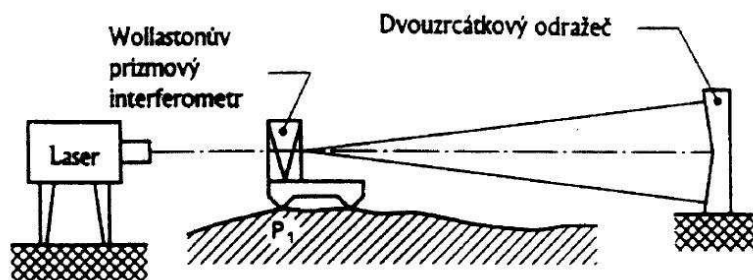


Obr. 2.7: Abbeho chyba (4)

Mimo měření polohy může být interferometr ve spojitosti s dalšími komponenty využit i k měření přímosti. První možností, jak ji určit, je způsob na obrázku 2.8.



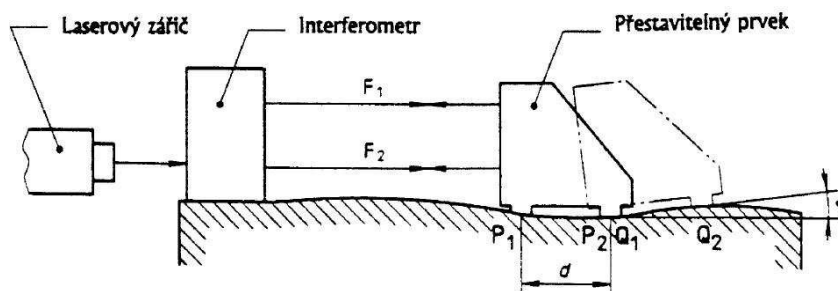
DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obr. 2.8: Interferometrické měření přímosti (4)

Při tomto postupu je použito Wollastonovo prizma a dvouzrcátkový odražeč. V prizmě je paprsek vycházející s laseru rozdělen a pokračuje k odražeči, jehož zrcátka jsou nastavena tak, aby odrážela paprsky nazpět. Pohybuje-li se nyní prizma rovnoběžně s osou zrcadla, budou fázová posunutí obou paprsků shodná. Vychýlí-li se však prizma v kolmém směru, dojde ke vzniku fázového posunu, z jehož velikosti je možné vychýlení určit.

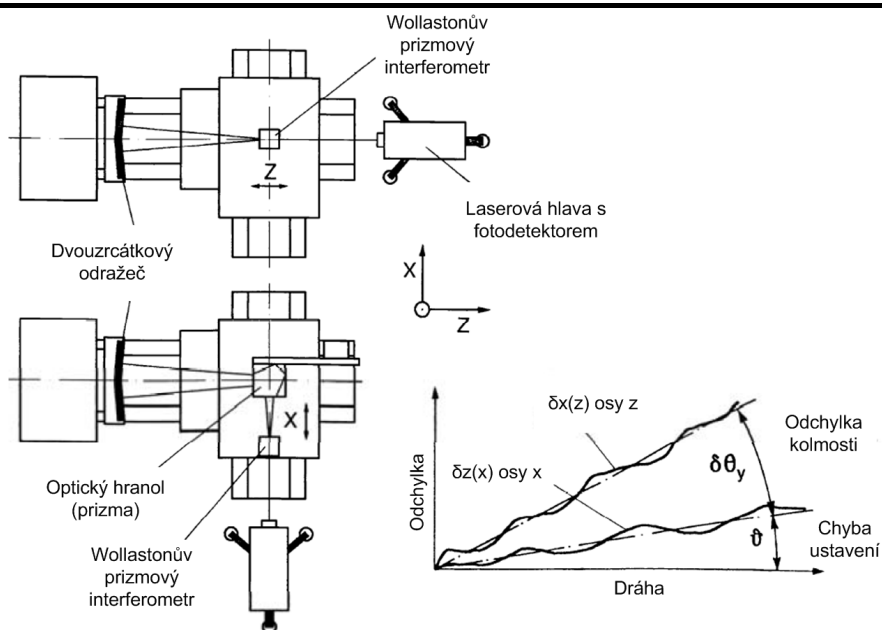
Druhý způsob, jak určit přímost, spočívá v měření úhlových odchylek (Obr. 2.9).



Obr. 2.9: Interferometrické měření přímosti pomocí úhlů (4)

Laserový paprsek je v interferometru rozdělen v tomto případě na dva paralelní. Vzájemný fázový posun vzniká úhlovým natočením přenastavitelného prvku při pohybu po měřené ploše. Z velikosti fázového posunu je možné určit úhel natočení α .

Schéma měření kolmosti za pomoci interferometru je na obrázku níže (Obr. 2.10). Dvouzrcátkový odražeč je pevně připevněn k vřetenu stroje a je spolu s laserovou hlavou nastaven rovnoběžně k ose z. S Wollastonovým prizmovým interferometrem je následně pohybováno stolem ve směru paprsku a je získána odchylka $\delta x(z)$. Kromě toho je tak určena i nesouosost mezi osou měření a referenční osou stolu. Ta je tvořena odražečem, a proto musí stát po dobu měření.



Obr. 2.10: Měření kolmosti dvou pohybových os laserinterferometrem (2)

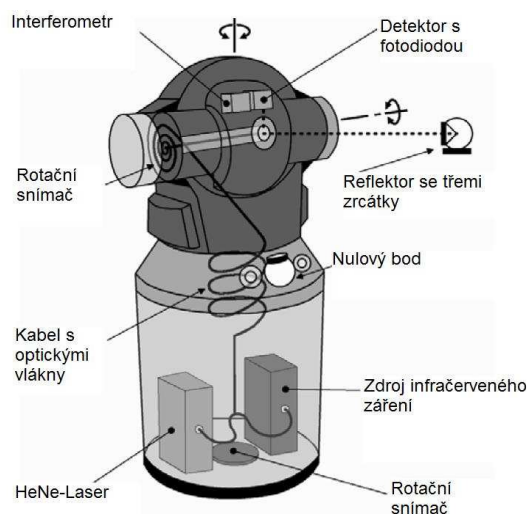
Ke změření druhé osy je laserová hlava přestavena o 90° . Optický hranol přesměruje paprsek na odražeč. Stolem společně s Wollastonovým interferometrem je nyní pohybováno v ose x a obdržena je tak odchylka přímosti $\delta z(x)$. Chybě kolmosti odpovídá rozdíl mezi odchylkami $\delta x(z)$ a $\delta z(x)$ (2).

2.2.2 Laser tracker

Interferometr byl počátkem devadesátých let 20. století rozšířen o možnost sledovat bod na libovolné dráze v prostoru a vzniklo zařízení laser tracker (Obr. 2.11). Tracker pracuje ve sférických souřadnicích. Jeho měřicí hlava s paprskem se naklápí ve dvou rotačních osách. Na sledovaném objektu je umístěn reflektor, jehož pozice je stanovena z interferometrického odměření vzdálenosti a z úhlových snímačů v otočné hlavě.

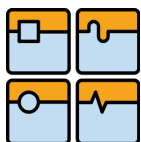


Obr. 2.11: Laser tracker společnosti API (5)

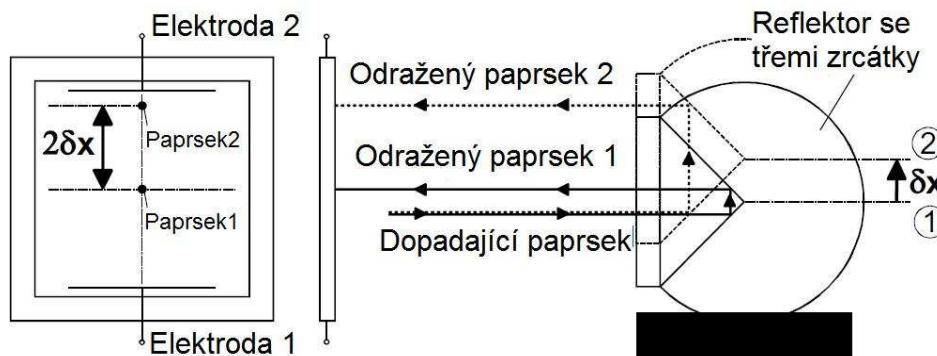


Obr. 2.12: Schéma laser trackeru (2)

Sledování probíhá tak, že se laserový paprsek odráží od reflektoru, který obsahuje tři pravouhlá zrcátka, zpět do fotocitlivé diody. Zůstává-li reflektor v klidu, nebo



pohybuje-li se v radiálním směru, směřuje odražený paprsek do středu diody. Při posunutí reflektoru o δx ve směru kolmém na paprsek dojde díky pravoúhlým zrcátkům k vychýlení paprsku o $2\delta x$ (Obr. 2.13). Toto vychýlení je zaznamenáno fotodiodou a její signál je použit k nastavení pohonů ovládajících vertikální a horizontální osu k nasměrování paprsku zpět do středu fotodiody.



Obr. 2.13: Princip reflektoru při sledování trackerem (2)

Hranice pohybu reflektoru jsou dány možným úhlem dopadu, který obvykle činí $\pm 20^\circ$ (6). Magnetickým uložením nebo motorizovaným upínáním (Active Target od společnosti API) je umožněno natáčení reflektoru a oblast měření je pak libovolná.

Interferometr stejně jako laser tracker obecně udává polohu v relativních souřadnicích. Na začátku měření je proto reflektor umístěn do nulového bodu (viz Obr. 2.12), jehož poloha je trackeru známa. Z tohoto místa se ručně umístí na sledovaný objekt a po celou dobu nesmí být sledovací paprsek přerušen, jinak dojde ke ztrátě absolutního pojmu o vzdálenosti (jedná-li se o inkrementální způsob určování vzdálenosti IFM).

Moderní sledovací zařízení obsahují kromě laseru ještě zdroj dvoufrekvenčního infračerveného laseru, pomocí něhož lze určit vzdálenost reflektoru absolutně (ADM). Tracker je schopen určit polohu libovolného bodu i poté, co je jeho sledovací paprsek přerušen (2).

V práci je použit k měření laser tracker T3 od společnosti API, který vlastní společnost TOSHULIN. V tabulce 2.1 jsou pro srovnání uvedeny základní parametry na trhu nej dostupnějších laser trackerů.



Typ laseru	ADM&IFM	ADM	ADM (vol. IFM)	ADM	ADM&IFM
3D přesnost	$\pm 5 \mu\text{m/m}$	$\pm 18 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$	$\pm 36 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$	$\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$
Dosah (vzdálenost)	60m	60m	55m	160m	80m
Dosah (úhel)	$+77^\circ/-60^\circ$	$+77^\circ/-60^\circ$	$+72,5^\circ/-52,5^\circ$	$\pm 145^\circ$	$\pm 45^\circ$

Tabulka 2.1: Srovnání přesnosti laser trackerů na trhu (5)



Z předchozí tabulky je zřejmé, že nejvyšší přesnost laser trackeru API T3 ze všech uvedených z něj dělá nejvhodnějšího kandidáta na měřidlo přesnosti obráběcích strojů.

2.3 *Současné využití laser trackeru v oblasti obráběcích strojů*

Zřejmě nejpokročilejší využití laser trackeru v oblasti obráběcích strojů našlo svůj původ v projektu Volumetric Accuracy for Large Machine Tools (v překladu „geometrická přesnost velkých obráběcích strojů“). Tento projekt vznikl ve spolupráci firem Automated Precision (API), Boeing, Siemens a Mag Cincinnati a umožňuje pomocí nové metody kompenzovat geometrické chyby pro pěti- až šestiosá centra v celém jejich pracovním prostoru.



Obr. 2.14: Připevnění reflektoru ve vřetení a laser tracker (7)

Dosavadní metody používaly k určení přesnosti na tříosých centrech 21parametrový model a jako měřidlo laserinterferometr. Každá z os x, y a z byla měřena zvlášť a pro každou muselo být měřidlo ustaveno zvlášť. Jednalo se tak o časově náročnou proceduru.

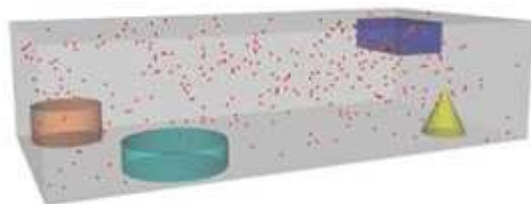
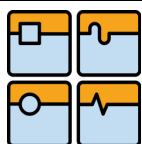
Nová metoda kompenzace využívá API T3 laser tracker, motorizovaný Active Target jako reflektor a speciálně vyvinutý software.

Tříosá centra mají, jak již bylo řečeno, 21 chybových parametrů. Víceosá centra jich mohou mít 40 až 50 (typické pětiosé centrum má 43 parametrů). Důvod, proč může tato metoda kompenzovat tolik parametrů, je ten, že pro každý bod je určena nejen pozice, ale i orientace v prostoru (7).

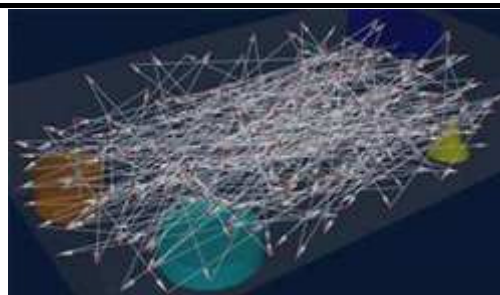
Prvním krokem metody je vytvoření kinematického modelu chyb z CAD dat stroje. V dalším kroku je softwarem vytvořen plán měření, který zahrnuje až 400 náhodných pozic, které reprezentují všechna možná nastavení os (Obr. 2.15).

Samotné měření trvá od jedné do tří hodin, během kterých se uskuteční tři cykly. První a druhý probíhá s upevněním reflektoru na krátkém upnutí. Při třetím běhu je reflektor upevněn na dlouhém upnutí, z čehož vzniknou v každé poloze tři hodnoty a právě i natočení (7).

Každý naměřený bod je s předchozím spojen vektorem, a tak je celý změřený prostor stroje přesně definován.



Obr. 2.15: Plán měření pro kompenzaci chyb (7)



Obr. 2.16: Polohové vektory (7)

Proces kompenzace je založený na numerickém řešení Chebychevových polynomů, což umožňuje v každém bodě určit jak polohu, tak i tři úhlové odchylky. Z hodnot vypočítá software kompenzační hodnoty, které nahraje přímo do řízení stroje.

Dle materiálů dodavatele dosáhly všechny testované stroje po použití metody zlepšení statické přesnosti a až třináásobného zpřesnění opakovaného najetí do polohy (7).

Hlavní rozdíl diplomové práce spočívá v tom, že jejím smyslem není kompenzovat chybové parametry, ale pouze je zmapovat, a na jejich základě definovat přesnost stroje.

2.4 Základy regresní analýzy

V kapitole *Zpracování naměřených dat a Vytvoření virtuálního obrobku* je hojně využíváno prokládání hodnot křivkami či rovinami. Nástroj, který umožňuje hledání a zkoumání závislostí proměnných získaných z měření, se nazývá regresní analýza.

Aby bylo možné z naměřených hodnot získat předpokládané závislosti, je na chybu nahlíženo jako na funkci vektoru polohy

$$\{a\} = f(\{X_0\}). \quad (2.10)$$

Základní princip regresní analýzy spočívá v hledání regresní funkce a určení jejích parametrů. Tvar regresní funkce může být libovolný, avšak je zvykem volit funkci s co nejméně parametry a přitom dostatečně flexibilní (8). K určení parametrů dané funkce je minimalizován tzv. reziduální součet čtverců S . Reziduum pro i -té pozorování ze souboru o velikosti n je definováno jako rozdíl mezi naměřenou závislou proměnnou y_i a hodnotou fitu \hat{y}_i (9).

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.11)$$

Pro jednoduchost je v práci uvažován pouze lineární regresní model (tzn. lineární vzhledem k regresním koeficientům), který vychází z jistých předpokladů (viz např. (8)). Lineární regresní funkce má následující tvar:

$$y = \sum_{j=1}^m \beta_j f_j(x), \quad (2.12)$$

kde β_j je j -tý regresní koeficient a $f_j(x)$ jsou známé funkce neobsahující regresní parametry. Důležitý předpoklad pro použití lineárního modelu je normální rozdělení měřených odchylek, což by měly hodnoty získané z měření splňovat. Není splněn však ten předpoklad, že v lineárním modelu jsou uvažovány chyby pouze u závislé proměnné, ne vstupní nezávislé. Vzhledem k poměru velikosti odchylek vůči rozsahu měřených hodnot může tento předpoklad být považován také za splněný.

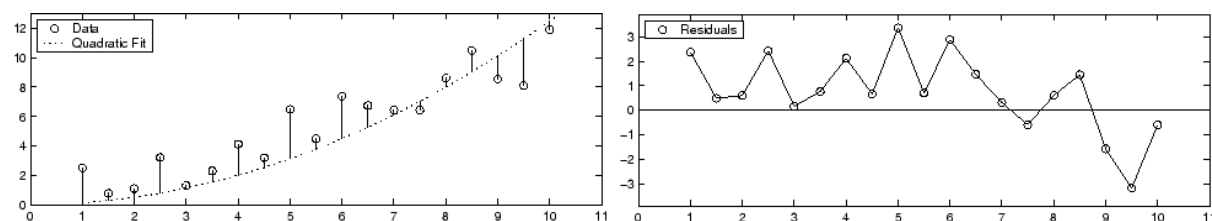


DIPLOMOVÁ PRÁCE

Hlavní nevýhodou metody nejmenších čtverců je citlivost na odlehlá pozorování, protože čtverec ještě umocňuje jejich odchylku. Proto se používají dvě metody, které efekt odlehlých pozorování minimalizují. První je metoda LAR (Least Absolute Residuals), ve které je místo čtverce vzdálenosti minimalizována samotná absolutní vzdálenost. Druhou používanou metodou je metoda Bisquare Weights. U této metody je přiřazena každému pozorování váha podle toho, jak daleko se od regresní křivky nachází, a to tak, že vzdálenější pozorování mají nižší váhu. Další možností, jak eliminovat vliv odlehlých pozorování, je jejich manuální vyloučení z výpočtu (9). U naměřených dat jsou takové metody velice vhodné. Jelikož v práci jsou zpracovávána umělá data bez větších odchylek, k potřebě použít vážené metody nedošlo.

Po vytvoření fitu ve statistickém softwaru následuje posouzení jeho vhodnosti. Mimo vizuální kontroly existují ještě další způsoby:

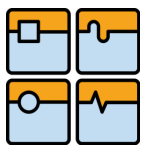
- Analýza reziduí: Za předpokladu, že fit je správný, odpovídají rezidua náhodné chybě měření. Jestliže jsou rozloženy jako např. na obrázku dole, ukazuje to na špatně zvolenou regresní funkci.



Obr. 2.17: Příklady nevhodně zvolených regresních funkcí (9)

- Koeficient korelace: Tento koeficient se pohybuje od 0 do 1 a popisuje, do jaké míry odpovídá vypočtený model zadaným hodnotám. Čím více se koeficient přibližuje hodnotě 1, tím se jedná o lepší fit. Člen \bar{y} značí průměrnou hodnotu. Matlab používá koeficient R-Square rovný r^2 .

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.13)$$



3 Metoda měření

Nejobecnější požadavky na postup zjišťování vlastností stroje jsou shrnuty na schématu níže. Nejprve musí být u daného postupu zaručena dostatečná přesnost a reprodukovatelnost výsledků. Dále by měly podmínky měření odpovídat skutečným praktickým úkolům (pracovní rychlosti, konfigurace nástroj-obrobek apod.). Na závěr jsou neméně důležitým hlediskem nároky na měření, které určují důležitou hospodárnost.



Obr. 3.1: Požadavky na postup zjišťování vlastností stroje (2)

Přímým měřením geometrické přesnosti obráběcích strojů se zabývá první a druhá část normy ISO 230 s obecným názvem *Zásady zkoušek obráběcích strojů*. V normě jsou uvedeny základní geometrické a metrologické definice, metody měření a způsoby určení tolerancí v pracovním prostoru obráběcího stroje.

Dále jsou v normě uvedeny obecné zásady geometrických zkoušek, jež se mají provádět na stroji v klidu, nebo za chodu na prázdko, aby byly vyloučeny jiné zdroje nepřesností, jako jsou např. vibrace či deformace. Důležitý je také teplotní stav stroje před zkouškou. Podmínky měření by se měly co nejvíce blížit normálním, a tedy pracovním. Je tudíž nutné stroj uvést do provozního, teplotně ustáleného stavu.

Data z měření musí mít vypovídací hodnotu. Je nutné stanovit, popř. kvantifikovat, podmínky, jež měly na měření vliv. Mezi tyto údaje patří (10) (11):

- čas a časový průběh měření,
- největší hodnota teplotního gradientu prostředí po dobu dvanácti hodin před měřením a po dobu měření,
- teplota v místě obrobku,
- způsob sestavení měření,
- provozní stav před měřením (okrajové podmínky, např. otáčky vřetena, rychlosti posuvu a doba zahřívání na provozní teplotu stroje),
- případné zatížení hmotností,
- postup a přesnost měření,
- schéma uspořádání měření s vyznačenými polohami vřetena, všech os včetně měřené a polohou měřeného bodu,
- popis průběhu a údaje o najíždění do poloh (doba, rychlost, nastavení saní, vzdálenost).

Během měření se tyto veličiny nemají příliš měnit a je nutné je proto kontrolovat. Při srovnávání výsledků z dvou měření musí být rozdílné podmínky zohledněny. Zejména standardní nejistota a tedy i opakovatelnost nastavení (viz kapitola 4) jsou obzvláště citlivé na změny teploty (10).



V této kapitole bude uvedena metoda měření za pomoci laser trackeru. Popsanou metodu lze obecně použít za různých zátěžných stavů, aniž by byl její princip pozměněn. Teplotní zatížení nemá na samotné měření vliv žádný. Přivedení statických sil ve formě modelových obrobků však může omezit upnutí měřidel. Obecně je u všech metod obtížné zahrnutí vlivů statických a dynamických sil od řezného procesu, které se proto často určují pouze z tuhosti za klidu v místě obrábění (2). Předmětem uvedené metody je měření pouze bez silového zatížení, čemuž v praxi odpovídá dokončovací obrábění.

3.1 Popis měřeného stroje

Pro účely měření bylo z disponovaných strojů společnosti TOSHULIN vybráno tříosé vertikální obráběcí centrum MCFV 2080 od společnosti TAJMAC-ZPS, a.s. (12). Výhodou tohoto stroje je absence rotační osy, která by komplikovala zpracování a vyhodnocování výsledků. Stroj obecně odpovídal zadání diplomové práce. Vřeteno stroje koná vertikální pohyb v ose Z a pracovní stůl se pohybuje v podélném směru (osa X) po vedení křížového supportu. Křížový support je veden po loži stroje v příčném směru (osa Y). Všechna lineární vedení mají valivé prvky. Ve všech osách jsou použita absolutní optoelektrická odměřovací pravítka, která dávají údaje řídicímu systému SINUMERIK 840D. Stroj je dále vybaven elektronickou kompenzací teplotních dilatací (12).



Obr. 3.2: Tříosé vertikální obráběcí centrum MCFV 2080 (12)

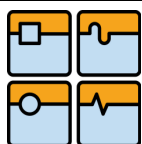
Osa X	2 030 mm
Osa Y	810 mm
Osa Z	810 mm
Max. posuv	15 000 mm/min
Přesnost polohování	0,016 mm
Opakovaná přesnost	0,006 mm

Tabulka 3.1: Vybrané parametry stroje

Nulový bod souřadného systému stroje leží v rohu stolu (Obr. 3.3). Jeho poloha bude hrát roli při programování stroje.



Obr. 3.3: Souřadný systém stroje



3.2 Zkušební stand

Umístění laser trackeru je ovlivněno zejména konstrukcí stroje a okolními podmínkami. Často proto není poloha trackeru pro optimální přesnost ideální. Několik základních pravidel je třeba při volbě polohy trackeru uvažovat. Ta by měla nejprve spočívat na pevném základu a je důležité vždy posoudit riziko rušení od okolních strojů, jejichž vibrace mohou přes stojan trackeru ovlivnit přesnost odměřování.

Přesnost interferometru v hlavě trackeru je výrazně vyšší, než je přesnost odměřovacího zařízení v otočných osách, které hlavou naklápí. Přesnost otočných os je navíc nepřímo úměrná vzdálenosti od reflektoru. Přesnost odměřování horizontální osy je ještě nižší než osy vertikální. Z toho vyplývající závěr je ten, že pro větší přesnost trackeru není ani tak důležitá vzdálenost, ale spíše omezení pohybu rotačních os. Nejvhodnější umístění trackeru od měřeného stroje je proto ve směru nejdelší měřené osy.

Společnost API nabízí ke svým laser trackerům dva typy reflektorů – pevný a motorizovaný Active Target. Pevný neumožňuje měřit pod úhlem větším než 20°, což ale pro navržené změření pracovního prostoru postačuje. Navíc je s ním dosaženo vyšší přesnosti než s typem motorizovaným.

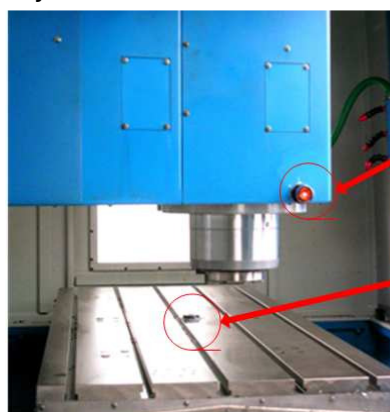


Obr. 3.4: Pevný třízrcátkový reflektor (5)



Obr. 3.5: Motorizovaný reflektor Active Target (5)

Reflektor byl umístěn nejprve do polohy na středu stolu, která nejlépe reprezentuje umístění obrobku (souřadnice stroje přibližně 1100X a 400Y). Pro měření vřetene musel být z důvodu přilnavosti umístěn na krytování vřeteníku. Pro následující měření bude zapotřebí vyrobit upínací přípravek do vřetene do místa, kde se při obrábění nachází nástroj.



Umístění na
vřeteníku

Umístění na
stole

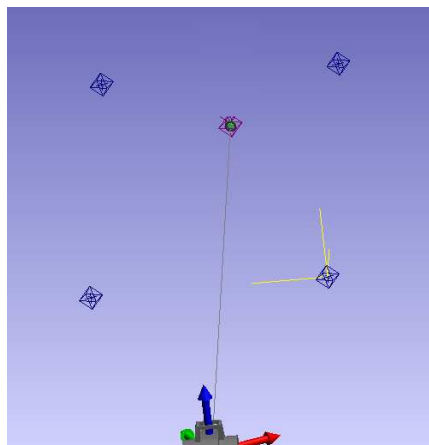
Obr. 3.6: Připevnění reflektoru ke stroji

3.3 Volba souřadného systému

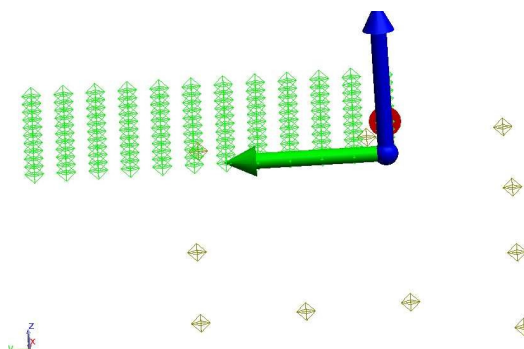
Laser tracker vztahuje naměřená data vždy k souřadnému systému. Tracker má sice zabudovaný vlastní souřadný systém, ale jeho použití je však naprosto nevhodné, jelikož jeho natočení závisí na ustavení měřidla. Má větší smysl orientovat souřadný systém podle os stroje a pro jednoduchost je vhodné umístit jeho střed do počátku souřadného systému stroje. Ve zkráceném měření na stroji ho střed stolu neprocházet a byl umístěn do první polohy měření.

K určení souřadného systému je třeba definovat vztaznou rovinu a přímku. Je-li pro měření důležitější osa vřetene, vezme se za pevnou a pouze se určí natočení souřadného systému dalším bodem umístěným na stole. Při případu tříosého centra bude za pevnou vzata rovina stolu, a to proto, že k ní bude připevněn virtuální obrobek, což zjednoduší jeho umístění do sítě bodů. Rovina vznikne proložením minimálně tří bodů, ale u stolu je lépe použít bodů víc, například čtyři, aby byla získána průměrná střední rovina. Na větší vzdálenosti se případné odchylky projeví výrazněji, tudíž je vhodné ještě se stolem najet do krajních poloh, kde je poloha středového reflektoru sejmuta (Obr. 3.6). Bod, který určí polohu nulového bodu, je umístěn do počátečního bodu měření stolu a systém je orientován dle střední hodnoty první měřené osy (Obr. 3.7). Všechny naměřené hodnoty se budou vztahovat k tomuto souřadnému systému.

Laser Tracker měří souřadnice nejprve ve svém systému a po měření je transformuje do zvoleného systému. Není proto problém i po měření použít jiný, software trackeru hodnoty převede do nově vzniklého systému.



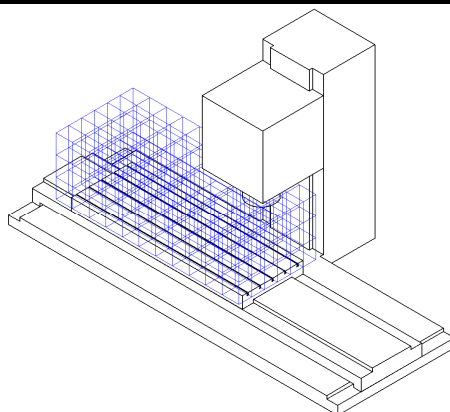
Obr. 3.7: Vytvoření roviny souřadného systému



Obr. 3.8: Natočení souřadného systému

3.4 Plán měřených bodů

Cílem práce i měření je stanovení mapy odchylek v pracovním prostoru stroje. Pro výslednou přesnost obrobku je tedy rozhodující relativní poloha nástroje vůči poloze stolu a tomu odpovídá i uspořádání měření.

**Obr. 3.9: Mapa odchylek pracovního prostoru obráběcího stroje**

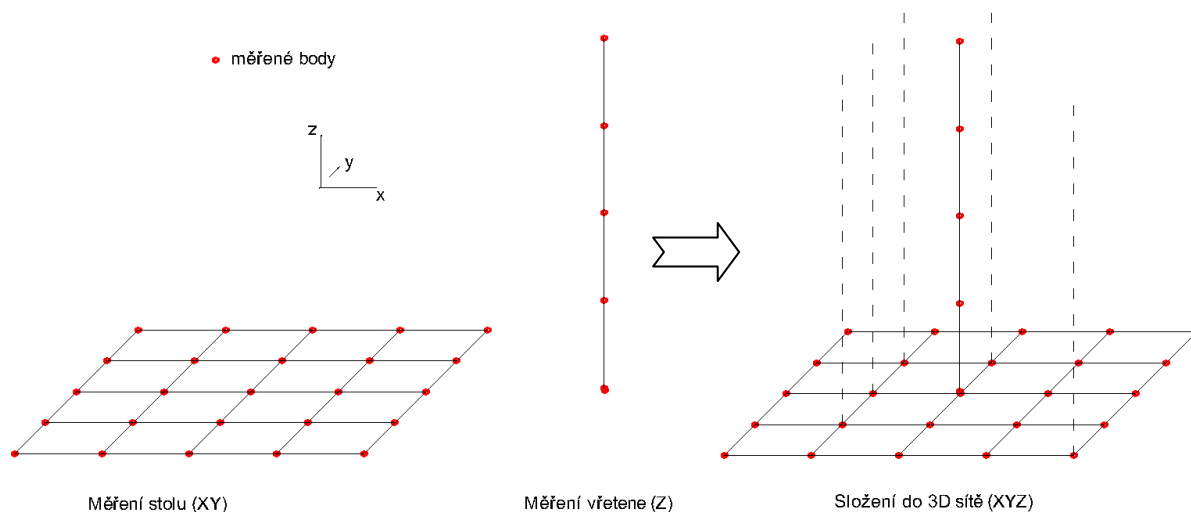
Data, ze kterých bude možné odvodit geometrické chyby v prostoru, se získají pouze změřením pohybu stolu a pohybu vřetene. Měřené polohy jsou voleny rovnoměrně (v síti) kvůli snadnějšímu zpracování. Nevýhodou rovnoměrného rozložení bodů ale může být, že se do bodů mohou zahrnovat i pravidelné odchylky, způsobené např. stoupáním šroubů.

Při měření je stroj naprogramován tak, že najíždí do určených bodů, kde setrvává, dokud není jeho poloha změřena. Pro sestavení způsobu najíždění bylo využito normy ISO 230-2 (11), která sjednocuje měření přesnosti polohování. Podle ní je počet měřených bodů pro osy délky do 2 000 mm minimálně 5 na metr a nejméně 5 celkově. U os nad 2 000 mm má být průměrná vzdálenost 250 mm.

Maximální možné rozměry sítě jsou dány pracovními pojedy stroje. Měřené rozměry, počet bodů, a tedy i hustota sítě, se před měřením stanoví s ohledem na velikost a tvar typického obrobku (viz kapitola 5.2), resp. na záměr uživatele. Prostor může být proměřen celý, to znamená, že do sítě mohou být umísťovány obrobky až po ty nejrozměrnější. Někdy však může uživatele zajímat pouze obrobek o konkrétním tvaru, resp. obrobky podobné velikosti. Pak stačí změřit odpovídající prostor s roztečí bodů, která koresponduje se zjišťovanými plochami. Velikost a tvar nástroje, se kterým bude skutečný obrobek opracován, do velké míry také ovlivňuje rozměry a rozteč měřených bodů. Problémy, které mohou s volbou rozteče dle nástroje vznikat, jsou popsány v kapitole 5.2.

Tvorba sítě u příkladového tříosého centra vychází z předpokladu, že odchylky osy Z (vřeteník) a os X a Y (křížový stůl) jsou na sobě nezávislé. Osa Z díky tomu může být proměřena pouze v jedné poloze stolu. Odchylky os X a Y jsou při měření brány za navzájem se ovlivňující. Pokud by se ukázalo, že nejsou, stačilo by příště změřit osu X a Y pouze v jednom nastavení vůči druhé.

Výsledná 3D síť vznikne tedy složením 2D sítě bodů stolu a 1D sítě bodů vřetene. Hlavní výhodou změření sítě stolu je to, že budou moci být od sebe odděleny geometrické chyby vedení a polohování stolu od chyb spojených s křížovými saněmi.

**Obr. 3.10: Princip vzniku prostorové sítě bodů**

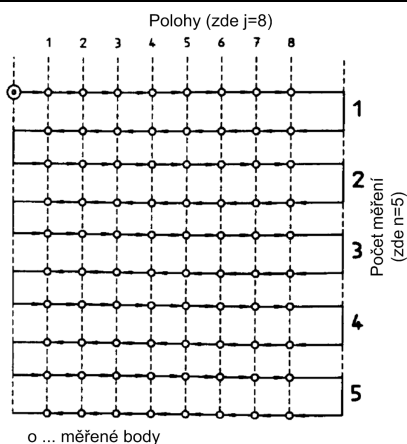
Původní záměr sice byl proměřit pracovní prostor celý, to ale v době vzniku práce nebylo kvůli vytíženosti stroje možné a plánované měření se tak muselo rozsahem spokojit s dobou šesti hodin. Bylo rozhodnuto zachovat počet opakování a hustotu sítě na úkor měřeného prostoru. Odchytky by sice byly změřeny v menší oblasti, ale metoda jejich vyhodnocení bude shodná jako pro celý prostor.

V každé poloze je nutné provést nejméně 5 měření z každého smyslu najetí. Rychlost mezi body je pevně daná a odpovídá obvyklým provozním rychlostem. Pohyby při měření se může např. kuličkový šroub dále ohřívat a při použití nepřímého odměřování by se do výsledků promítaly časově závislé teplotní dilatace. Z tohoto důvodu je možné použít tři různé způsoby nastavení poloh, které se liší časovou náročností.

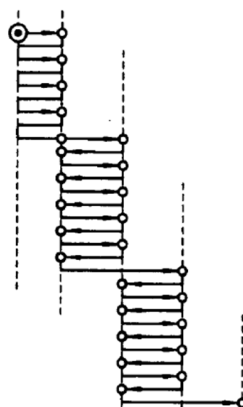
Na obrázku (Obr. 3.11) je zobrazen standardní zkušební cyklus pro 8 měřených poloh dle normy ISO 230-2 (11). Tento způsob je nejčastější a vyznačuje se nejkratší délkou a potřebným časem. Nevýhodou je dlouhý interval mezi nastavením první polohy v jednom a v druhém smyslu, což může ovlivnit naměřené hodnoty, zejména necitlivost B a opakovatelnost R (kapitola 4) (2).

Cyklus se zpětným krokem (Obr. 3.12) dovoluje snížit časový interval nastavení všech poloh z obou směrů. Celková dráha nutná k proměření bodů je však delší, a tudíž rostou i časové nároky. Díky kratšímu intervalu jsou necitlivost a opakovatelnost ovlivněny teplotními vlivy jen minimálně, průměrná dvoustranná polohová úchylka M však výrazněji (11).

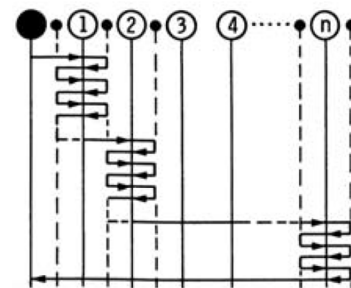
Poslední způsob je uveden v normě VDI/DGQ 3441 (10) jako cyklus s kyvadlovým krokem (Obr. 3.13). Časový interval mezi nastavením z obou směrů je u jedné polohy nejmenší, ale doba mezi nastavením dalších poloh je delší. Teplotní vlivy se zde mohou projevat jako systematická odchylka polohy (2).



Obr. 3.11: Standardní zkušební cyklus (11)



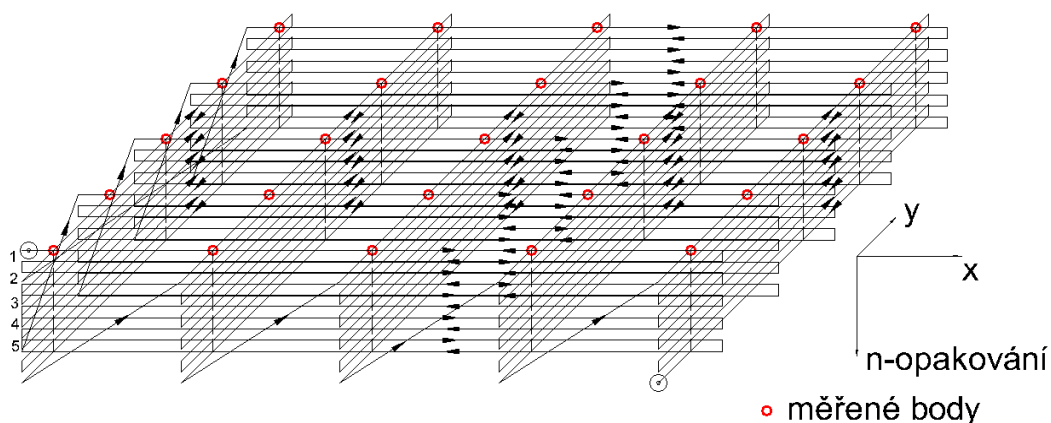
Obr. 3.12: Cyklus se zpětným krokem (11)



Obr. 3.13: Cyklus s kyvadlovým krokem (2)

Měření je časově velmi náročné vzhledem k množství bodů, tudíž byl vybrán standardní cyklus, jenž je z výše uvedených způsobů nejkratší.

Princip najíždění do poloh u stolu tříosého centra je dole na obrázku.

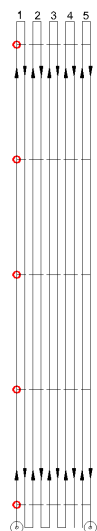


Obr. 3.14: Princip najíždění do poloh u stolu

Tímto způsobem, kdy stůl koná standardní cyklus nejprve ve směrech osy x a následně osy y, bude možné stanovit závislost mezi chybou v jedné ose a nastavením vůči ose druhé a zároveň pro každé nastavení os provést přesnost polohování dle ISO 230-2. Pokud se ukážou chyby v osách na sobě nezávislé, bude při příštím měření stačit stanovení přesnosti polohování dle ISO 230 v jednom nastavení a měření se značně urychlí. Způsob najíždění do poloh pro vřeteno je na obrázku dole (Obr. 3.14).



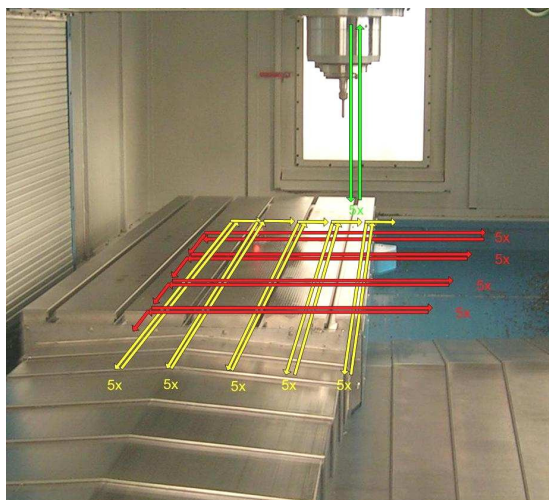
DIPLOMOVÁ PRÁCE



z

n-opakování

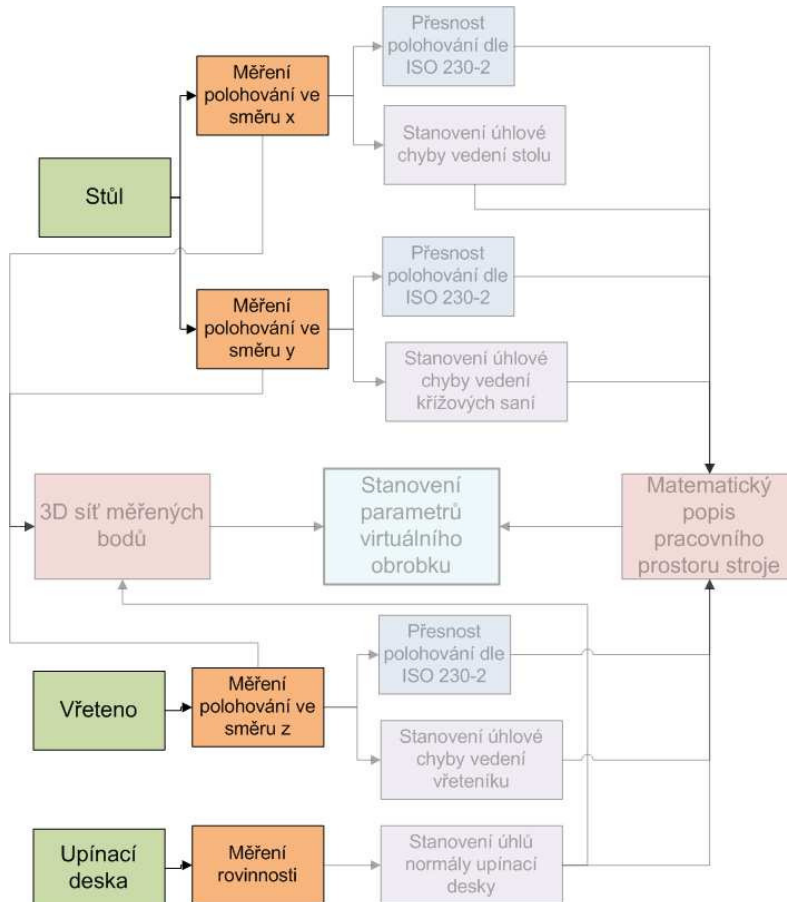
• měřené body



Obr. 3.15: Princip najíždění do poloh osy z

Obr. 3.16: Vyznačený pohyb přímo na stroji

Na schématu dole je shrnut postup jednotlivých měření. Stanovení rovinnosti upínací desky bude uvedeno i s výsledky v podkapitole 3.6.



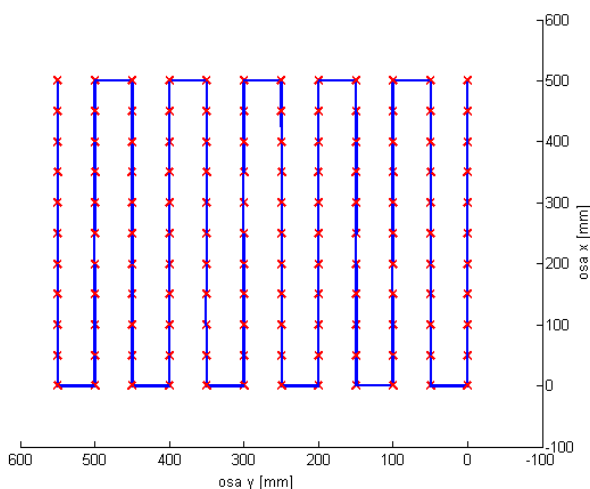
Obr. 3.17: Plán měření



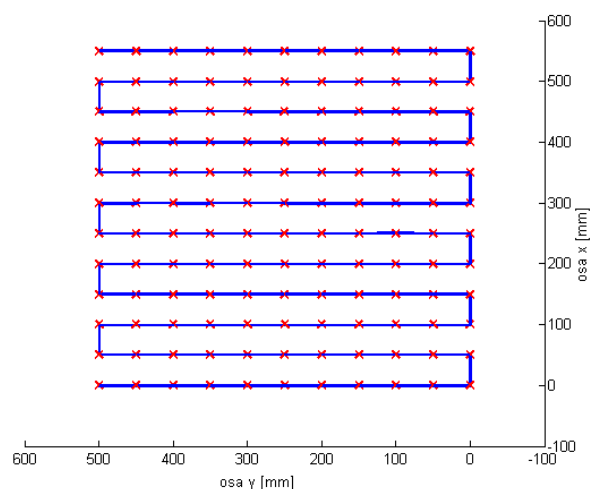
3.5 Průběh a výsledky neúspěšného měření

Na všechna měření byl stanoven časový rozsah jedné směny, a tudíž byl omezen i počet změřitelných bodů. Je možné upravit rozměry, umístění a rozteč měřené sítě. Doba změření jedné polohy je pevná a byla zjištěna jako 8 vteřin. Navrhnuté měření bylo zvoleno jako kompromis mezi vypovídací hodnotou o celém prostoru a zároveň dostatečnou roztečí pro přesnost virtuálního obrobku – měřený prostor bude krychle o hraně 600 mm s roztečí bodů 50 mm.

Při programování stroje nastaly neočekávané problémy způsobené nekvalifikovanou obsluhou CNC stroje. Jelikož bylo po delší době zřejmé, že měření v navržené podobě nebude možné uskutečnit, byl ve zbytku času alespoň použit program převzatý z vyvrtávání děr, jenž byl odladěn. Dráha stolu vzniklá z tohoto programu je na obrázcích dole. Stůl body jednoduše projel. Celý cyklus byl pro oba směry najíždění zopakován třikrát.



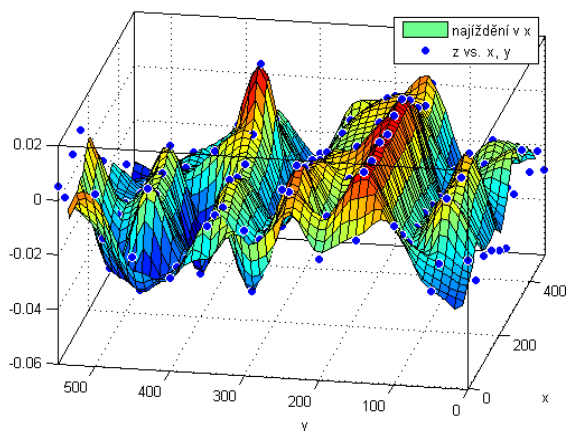
Obr. 3.18: Najíždění v ose x



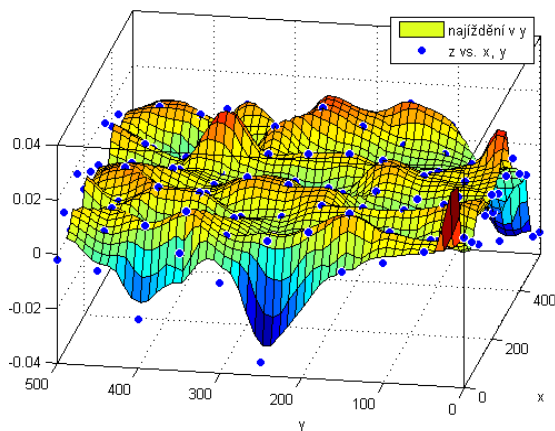
Obr. 3.19: Najíždění v ose y

Hlavním nedostatkem tohoto měření stolu není ani tak malý počet opakování, jako stejný smysl najíždění do měřených poloh. Stejný smysl totiž zanáší do výsledků systematické chyby laser trackeru, které jsou vzhledem ke skutečným chybám stroje příliš velké a které navíc není možno odstranit.

Význam předchozího odstavce je zřejmý z následujících grafů, které by měly mít navzájem přibližně stejný průběh. Interpolované plochy měřenými body ale mají vlnovitý charakter, patrný nejvíce v grafu vlevo. Jak totiž bylo uvedeno v kapitole 3.2, je přesnost trackeru závislá na velikosti a směru natáčení snímací hlavy. Hlava trackeru je umístěna nad rovinou stolu. Pohybuje-li se stůl ve směru osy x (od a k trackeru), je pohyb snímán ve vertikální rovině. V této rovině ale dosahuje přesnost trackeru nejnižších hodnot, což se při stejném smyslu najíždění projevuje právě jako systematická chyba. V obrázku vlevo je větší složka hlavního snímacího pohybu v horizontální rovině, kde tracker dosahuje vyšších přesností. Systematické chyby se pak projevují méně (menší rozdíl v ose z při najíždění opačnými směry).

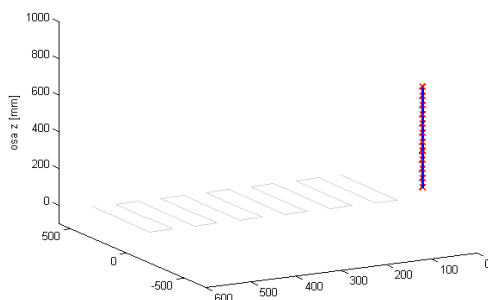


Obr. 3.20: Najíždění stolu ve směru x



Obr. 3.21: Najíždění stolu ve směru y

Problém se vyskytl i při programování osy z (vřeteno). Data z této osy vznikla manuálním přestavováním vřetene s krokem 50 mm a cyklus nebyl zopakován.



Obr. 3.22: Najíždění v ose z

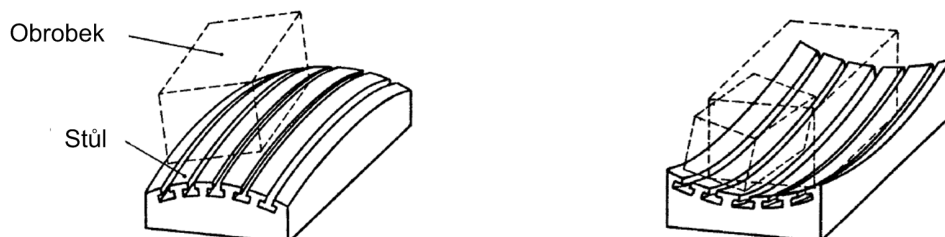
Přesnost manuálně nastavené polohy svědčí spíše o šikovnosti obsluhy stroje a s přesností polohování v CNC osách nemá nic společného.

I když předchozí hodnoty pocházejí z reálného měření, výsledky z nich by přesto byly diskutabilní. Bylo proto rozhodnuto vytvořit data umělá, která budou alespoň v požadovaném tvaru, na něhož byly připraveny programy (viz kapitola 3.7).

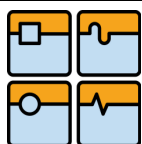
3.6 Měření rovinnosti upevňovací desky

Po měření geometrických chyb je vhodné stanovit i přesnost upínacích míst obrobku a nástroje a jejich vzájemnou polohu k osám stroje. Stanovení přesnosti upínacího kužele nástroje však není laser trackerem možné a není proto v metodě zahrnuto.

Rovinnost stolu je nezávislá na jeho poloze. Na obrázcích dole jsou uvedeny jeho možné geometrické odchylky.



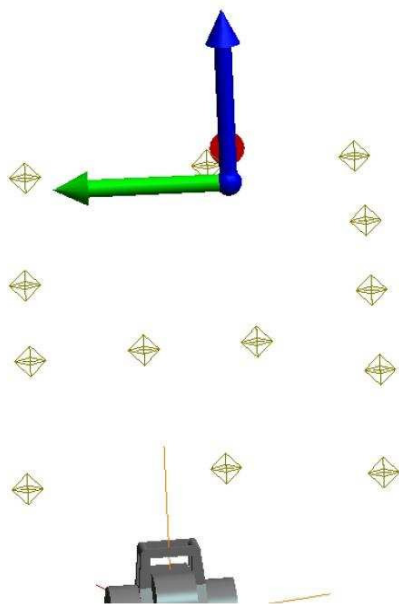
Obr. 3.23: Geometrické chyby upínání obrobku (2)



Měření rovinnosti probíhá manuálním přestavováním reflektoru po desce stolu, přičemž souřadnice jsou vztaženy ke stejnému souřadnému systému jako data z měření geometrické přesnosti pracovního prostoru. Manuálním přestavováním reflektoru a nečistotami v kontaktu se stolem mohou vznikat chyby. Pro příkladové měření bylo navrženo rozčlenit desku stolu vzhledem k jejím rozměrům na body s rovnoměrnou plošnou hustotou s roztečí po 400 mm a v každém takovém bodě, resp. v oblasti okolo bodu, vždy umístit a změřit reflektor alespoň 5krát. Výsledky by pak na nečistoty citlivé tolik nebyly a bylo by je možné statisticky zpracovat. Na stroji proběhlo měření v každém bodě pouze jednou a s menší hustotou z časových důvodů (Tabulka 3.2). V tabulce je v posledním řádku uvedena i rovinnost vzata jako rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou.

Protože přestavování reflektoru probíhá ručně a bez upínání, které bylo použito pro stanovení souřadného systému, jsou hodnoty v ose z nižší o výšku upínacího přípravku reflektoru.

Důvodem měření rovinnosti stolu je to, že bude-li obrobek (virtuální i skutečný) umístěn na desku stolu, mohou být data z 3D sítě kompenzována o odchylky způsobené nakloněním desky.



Obr. 3.24: Rozmístění měřených bodů

Název bodu	x	y	z
1	-139,247	312,827	-10,151
2	-166,893	25,154	10,166
3	-1737,421	-201,08	-10,162
4	-1121,03	-204,078	0,13
5	-771,824	-197,725	-10,13
6	-224,897	-190,509	-10,136
7	163,555	-183,192	-10,135
8	148,715	290,784	-10,13
9	122,534	293,273	-10,13
10	-519,976	301,21	-10,145
11	-974,398	299,464	-10,144
12	-938,807	134,64	-10,146
13	-919,836	-28,818	-10,149
Rovinnost			0,0360

Tabulka 3.2: Hodnoty z měření rovinnosti

3.7 Vytvoření umělých dat

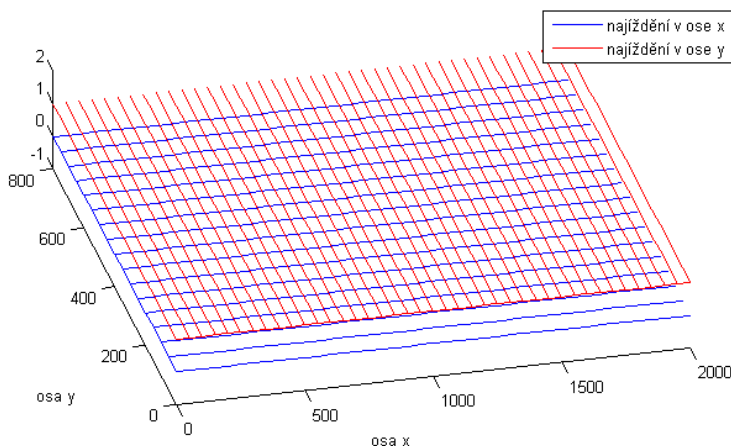
Data z uskutečněného měření nejsou získána navrženým způsobem polohování ani v potřebném rozsahu opakování cyklů. Vyhodnocení bude provedeno na datech, která byla vygenerována sice náhodně, avšak specifickým způsobem popsáním zejména v příloze. Všechny vytvořené funkce v Matlabu, jež slouží pro zpracování umělých dat, budou aplikovatelné i na později provedená měření na stroji. Způsob zpracování výsledků je popsán v následující kapitole.

Při návrhu „virtuálního“ měření nevznikají žádná omezení na množství získaných dat a byl proto vzat v úvahu celý pracovní prostor, jež je definován pojezdy v jednotlivých osách. Z katalogu výrobce stroje je pojezd v ose x 2 030 mm, v ose y a z 810 mm.



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Krok mezi body byl ponechán 50 mm. Pro jednoduchost byl tedy uvažován měřený prostor o rozměrech 2 000 mm x 800 mm x 800 mm (Obr. 3.25).



Obr. 3.25: Dráha stolu v umělých datech

Při definovaných parametrech je rozsah měření dohromady 14 110 hodnot. V reálném měření na stroji bylo zjištěno, že získání jedné hodnoty trvá v průměru 10 vteřin. Z toho plyne, že ve skutečnosti by toto měření trvalo 40 hodin. To je pro většinu výrobců příliš, nehledě na výrazné oteplení stroje. Ale již při zvýšení kroku na 100 mm je celková doba nutná na odstavení stroje snížena na přijatelných 10 hodin. Bude však nakonec na výrobcí, zda bude chtít měřit celý pracovní prostor a jakou zvolí hustotu bodů, čímž má k dispozici možnost náročnost měření upravit.

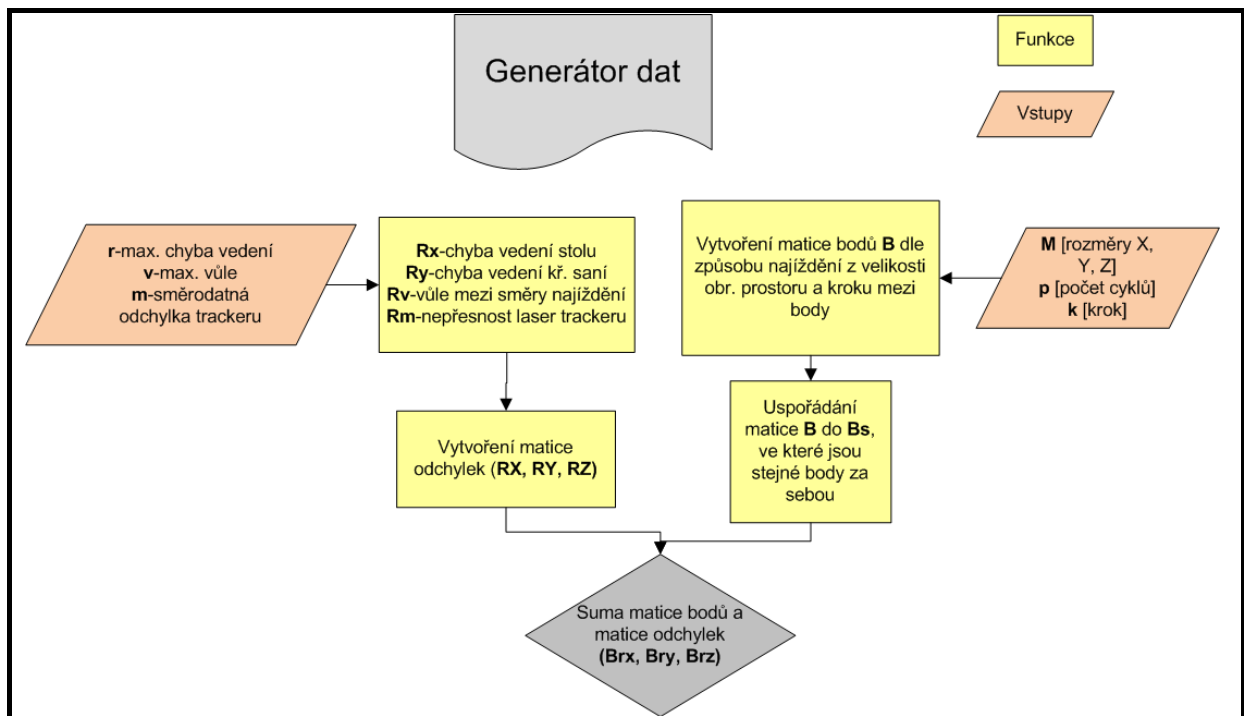
Funkce na vytvoření „virtuálních“ naměřených dat je podrobněji popsána v příloze A. Jedná se o funkci, do níž mj. vstupují parametry jako max. chyba vedení, max. vůle a chyba trackeru, a která pomocí nich generuje odchylky způsobem shrnutým právě v příloze. Bylo zvoleno, aby se tato uměle vzniklá data svojí formou a obsahem co nejvíce blížila reálně naměřeným datům, a aby v nich byly zahrnuté jevy, které se bude metoda vyhodnocování snažit odhalit. Skutečná data nebyla k dispozici, funkce na generování dat může proto vycházet pouze z neověřených a zjednodušených předpokladů:

- chyby vedení stolu, křížových saní a vřetene jsou navzájem nezávislé,
- vůle se vyskytuje pouze ve směru najíždění,
- laser tracker měří hodnoty s normálním rozdělením pravděpodobnosti.

Výsledná matice odchylek R od ideální polohy je pak součtem jednotlivých matic složek:

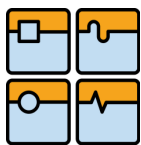
$$R = R_x + R_y + R_v + R_m, \quad (3.1)$$

kde R_x je matice prostorových chyb vedení stolu, R_y křížových saní, R_v je matice vůlí pro daný směr najíždění a R_m je matice nepřesnosti měření. Na obrázku dole je schéma programu se všemi vstupními parametry.



Obr. 3.26: Vývojový diagram pro generátor odchylek

Při měření reálných dat laser trackerem na stroji je referenční souřadný systém tvořen způsobem popsaným v kapitole 3.3, resp. vztažné osy jsou vytvořeny ze zvolených naměřených bodů. Generátor odchylek využívá ideální souřadný systém, který v reálu není možné změřit. Tento rozdíl na zpracování výsledků nic nemění a je proto ponechán.



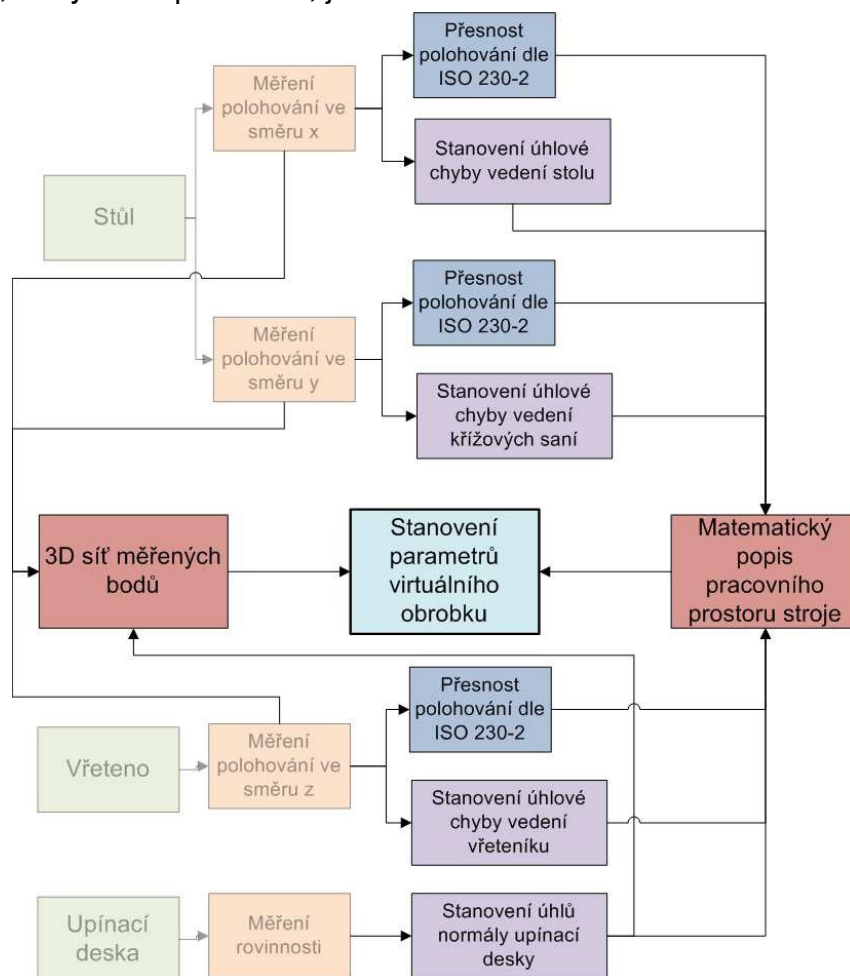
4 Zpracování naměřených dat

V této kapitole je provedeno zpracování hodnot z měření laser trackerem, resp. uměle vytvořených dat.

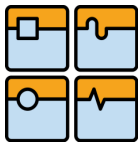
Jako první je provedeno vyhodnocení přesnosti polohování dle normy ISO 230-2. Jedná se o normovaný postup, ke kterému však zatím nebyl použit laser tracker. Přesnost trackeru byla doposud řádově nižší než u klasického interferometru. Očekává se ale, že bude tento rozdíl postupně smazáván a stane se velkou výhodou navrhnutého postupu, že z jedné provedeného měření budou moci být vyhodnoceny parametry virtuálního obrobku a zároveň určena i přesnost polohování všech os.

V následující kapitole je navrženo sestavení matematického popisu geometrických odchylek obráběcího prostoru stroje, kde jsou jednak částečně využity parametry z přesnosti polohování, tak i úhlové odchylky vedení, které budou určeny v kapitole (4.2.2). Důvod, proč byl popis sestavován, je ten, že jeho vstupní data jsou získána pouze z malé části naměřených hodnot, a pokud by se ukázal matematický popis jako dostačující, celkové nároky na měření budou výrazně sníženy.

Celý postup, který bude proveden, je shrnut na schématu.



Obr. 4.1: Plán vyhodnocení výsledků



4.1 Stanovení přesnosti polohování dle ISO 230-2

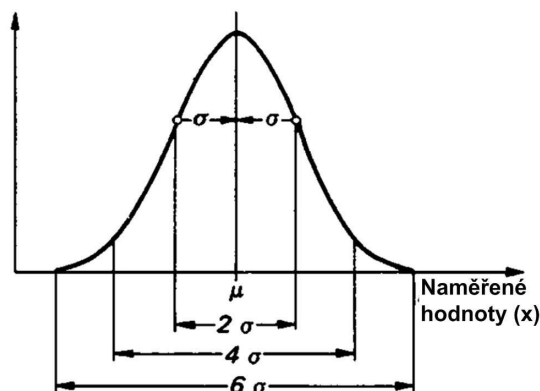
Zpracování naměřených dat v této kapitole vychází z normy ISO 230-2. Použitím klasických měřidel uvedených v normě je přesnost polohování osy bez nového přenastavení provedena pouze v jedné konfiguraci vůči ostatním osám. Laser tracker a provedené měření dovoluje stanovit přesnost polohování ve více konfiguracích při jednom ustavení měřidla. Z toho plyne zajímavá možnost porovnat výsledky a zmapovat parametry přesnosti polohování v celém prostoru obráběcího stroje.

Přesnost polohování je více či méně ovlivněna chybami. V těchto chybách jsou zahrnuté jednak chyby systematické, tak i chyby náhodné. Pomocí statistického zpracování lze oba druhy chyb navzájem oddělit. Systematické chyby se za stejných podmínek opakují a dají se často kompenzovat. Na rozdíl od nich se náhodné chyby, pramenící např. z nepřesnosti měřicího zařízení, mohou lišit i při srovnatelných podmínkách měření a projevují se jako rozptyl okolo střední hodnoty (11).

Systematické chyby	<ul style="list-style-type: none">– chyba rozteče měřicího systému– vnitřní zdroje– geometrické chyby vedení– vůle– statická poddajnost– ...
Náhodné chyby	<ul style="list-style-type: none">– tření (Stick-Slip efekt)– vůle v uloženích– kmitání– opotřebení nástroje– nepřesnost měřicího zařízení– ...

Tabulka 4.1: Systematické a náhodné chyby

Rozdělení četností naměřeného souboru dat obvykle odpovídá Gaussově křivce (normální rozdělení) a lze jej tedy jednoznačně popsat střední hodnotou μ a standardní nejistotou σ . Jelikož je počet naměřených hodnot omezený, používá se místo σ a μ pouze odhad střední hodnoty \bar{x} a odhad standardní nejistoty s .



Obr. 4.2: Normální rozdělení (10)

Pro každou osu jsou dle normy (11) stanovovány následující parametry:

- úchylka polohy (rozdíl mezi zadanou P_i a naměřenou polohou P_{ij})

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i \quad (4.1)$$

- průměrná jednostranná úchylka v poloze P_i při najíždění v kladném smyslu:

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow \quad (4.2)$$

a v záporném smyslu:

$$\bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow \quad (4.3)$$

- průměrná dvoustranná úchylka v poloze P_i :

$$\bar{x}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2} \quad (4.4)$$

- necitlivost v poloze P_i :

$$B_i = |\bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow| \quad (4.5)$$

- odhad jednostranné standardní nejistoty v poloze P_i :

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2} \quad (4.6)$$

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2} \quad (4.7)$$

- jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze P_i :

$$R_i \uparrow = 4 s_i \uparrow \quad (4.8)$$

$$R_i \downarrow = 4 s_i \downarrow \quad (4.9)$$

- dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze P_i :

$$R_i = \text{největší z hodnot} [2 s_i \uparrow + 2 s_i \downarrow + B_i; R_i \uparrow; R_i \downarrow] \quad (4.10)$$

- jednostranná a dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose:

$$R \uparrow = \max [R_i \uparrow] \quad (4.11)$$

$$R \downarrow = \max [R_i \downarrow] \quad (4.12)$$

$$R = \max [R_i] \quad (4.13)$$



- jednostranná systematická úchylka polohy v ose:

$$E \uparrow = \max[\bar{x}_i \uparrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow] \quad (4.14)$$

$$E \downarrow = \max[\bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow] \quad (4.15)$$

- dvoustranná systematická úchylka polohy v ose:

$$E = \max[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow] \quad (4.16)$$

- průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose:

$$M = \max[\bar{x}_i] - \min[\bar{x}_i] \quad (4.17)$$

- jednostranná přesnost nastavení polohy v ose:

$$A \uparrow = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow] \quad (4.18)$$

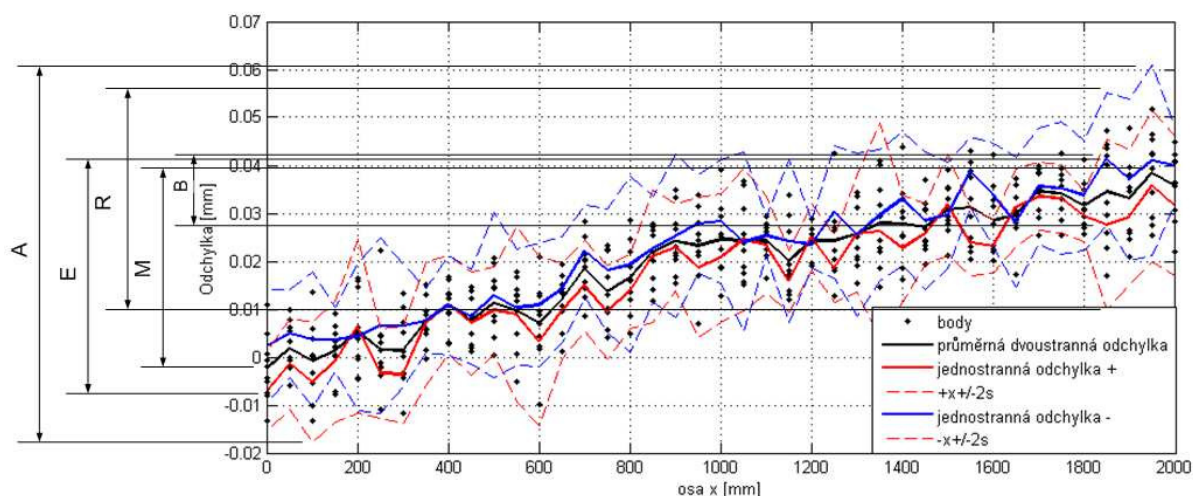
$$A \downarrow = \max[\bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (4.19)$$

- dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose:

$$A = \max[\bar{x}_i \uparrow + 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + 2s_i \downarrow] - \min[\bar{x}_i \uparrow - 2s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - 2s_i \downarrow] \quad (4.20)$$

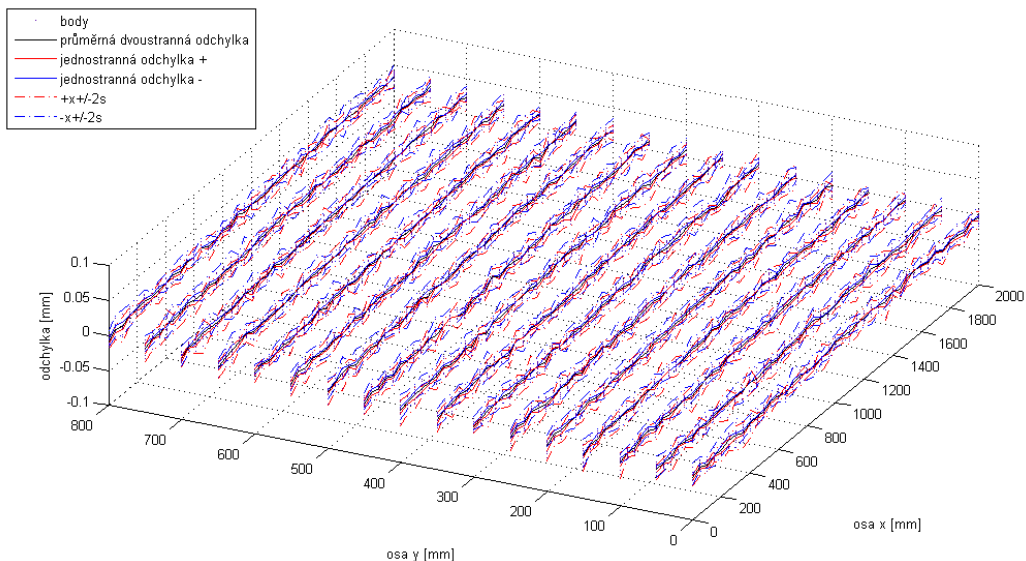
V programu Matlab byla připravena funkce, která určuje všechny předešlé parametry a ukládá je do souboru, ve kterém je možno parametry lehce dohledat pro libovolné nastavení vůči druhé ose (viz příloha A). Funkce byla otestována na vytvořených datech a je použitelná pro oba směry najíždění i pro osu z. Dále jsou uvedeny pro příklad parametry osy x.

Vypočtené statistické parametry pro každý bod osy jsou shrnuty do grafu (zde pro nastavení y=0).



Obr. 4.3: Vypočtené parametry přesnosti osy x při nastavení y=0

Funkce umožňuje vyhodnocovat parametry nejen pro jedno, ale lze pomocí ní získat průměrné nebo i maximální hodnoty pro všechna nastavení vůči ose y.



Obr. 4.4: Vypočtené parametry přesnosti osy x pro všechna nastavení y

Tento graf bude sloužit k odhalení tendencí, závislostí a problematických míst názorněji než tabulka, ve které budou uvedeny konkrétní parametry (Tabulka 4.2).

x	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	...
y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...
↑x	-0,043	-0,035	-0,04	-0,034	-0,04	-0,03	-0,03	-0,037	-0,029	-0,029	-0,032	...
↓x	-0,033	-0,028	-0,034	-0,032	-0,03	-0,02	-0,03	-0,03	-0,026	-0,026	-0,025	...
∅x	-0,08	-0,032	-0,037	-0,033	-0,03	-0,03	-0,03	-0,034	-0,027	-0,027	-0,029	...
Bi	-0,009	-0,007	-0,007	-0,001	-0,01	-0,01	-0,01	-0,007	-0,003	-0,004	-0,007	...
B	-0,015											...
∅B	-0,005											...
↑si	0,0037	0,0049	0,038	0,0043	0,006	0,004	0,009	0,0088	0,0101	0,034	0,004	...
↓si	0,0075	0,0053	0,0039	0,0076	0,007	0,007	0,001	0,006	0,0049	0,007	0,005	...
↑Ri	0,0149	0,0196	0,0152	0,017	0,025	0,017	0,035	0,0354	0,0403	0,0136	0,015	...
↓Ri	0,03	0,0213	0,0156	0,0302	0,0	0,028	0,041	0,0239	0,0197	0,0279	0,021	...
Ri	0,0318	0,0276	0,0221	0,0302	0,037	0,035	0,046	0,0367	0,0403	0,0279	0,024	...
↑R	0,0403											...
↓R	0,0409											...
R	0,0456											...
↑E	0,0432											...
↓E	0,0332											...
E	0,0432											...
M	0,0381											...
↑A	0,0495											...
↓A	0,0386											...
A	0,0495											...

Tabulka 4.2: Ukázka z tabulky s parametry přesnosti polohování pro osu x



4.2 Příprava matematického popisu pracovního prostoru

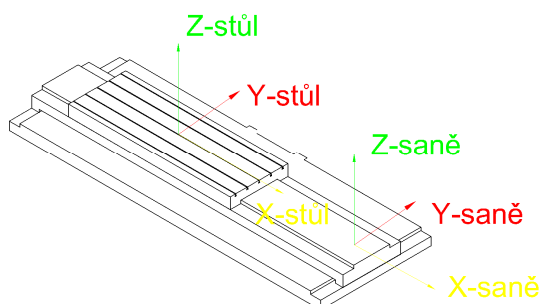
Matematický model je často používán při aktivní kompenzaci chyb stroje. Jsou-li známy úhlové chyby pohybových os, mohou být zaneseny a řídicí systém se bude snažit minimalizovat výslednou chybu kompenzačním přírůstkem polohování. Dále v něm mohou být uvažovány faktory jako teplota a zatížení stroje. Tento model je součástí programu řídicího systému a běžný uživatel nemá možnost do něj nahlédnout.

V této kapitole je popsáno odvození matematického popisu obrábění pro stroj MCFV 2080. V literatuře je popsána tvorba matematického modelu obráběcího stroje, ale vesměs za jiným účelem. Je zde totiž používán k predikci chování pod statickým a teplotním zatížením a tedy k přímé úloze kinematiky. Laser tracker již zjišťuje skutečnou dráhu akčního členu v prostoru a není třeba ji určovat. Naopak se nabízí použít inverzní přístup ke zjištění příčin odchylek skutečné dráhy. V modelu jsou totiž úhlové odchylky vedení zahrnuty.

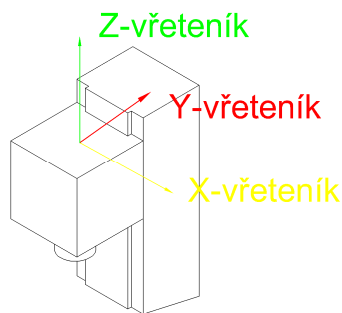
V této práci byla snaha dvě. Jednak použít inverzní přístup a z dráhy, která byla změřena laser trackerem, tato úhlová natočení vedení určit, a za druhé pak ze znalosti úhlových odchylek opět sestavit model, který bude moci být využit při popisu přesnosti obrábění virtuálního obrobku. Z důvodu značné komplikovanosti byl inverzní přístup pro potřeby práce zjednodušen (kapitola 4.2.2).

Vertikální obráběcí centrum MCFV 2080 pohybuje stolem ve dvou osách na křížových saních. Chyba polohy desky stolu vzniká tedy součtem úhlové odchylky vedení stolu a úhlové odchylky vedení křížových saní. Na obrázku dole vlevo jsou zobrazeny souřadné osy a zároveň 3 složky prostorové chyby polohy stolu a křížových saní a na obrázku vpravo pro vřeteník. Záměr je tyto tři složky popsat určitou závislostí.

U obráběcích strojů jsou (alespoň by měly být) úhlové chyby vedení velice malé. Z rovnic kapitoly (2.1.2) se dá vyvodit, že vliv natočení je na chybu v ose pohybu zanedbatelný, a že chyba v ose pohybu (osa x u stolu, osa y u křížových saní) je daná pouze přesností odměřování a řízení polohové smyčky. Chyby ve zbývajících dvou osách budou naopak považovány pouze za výsledek úhlového natočení vedení.

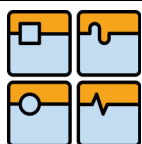


Obr. 4.5: Tři složky chyby stolu a křížových saní



Obr. 4.6: Tři složky chyby vřeteníku

Závěru z předešlého odstavce odpovídá i způsob vyhodnocení naměřených dat. Parametry přesnosti polohování byly již stanoveny, v kapitole 4.2.2 budou určena natočení vedení.



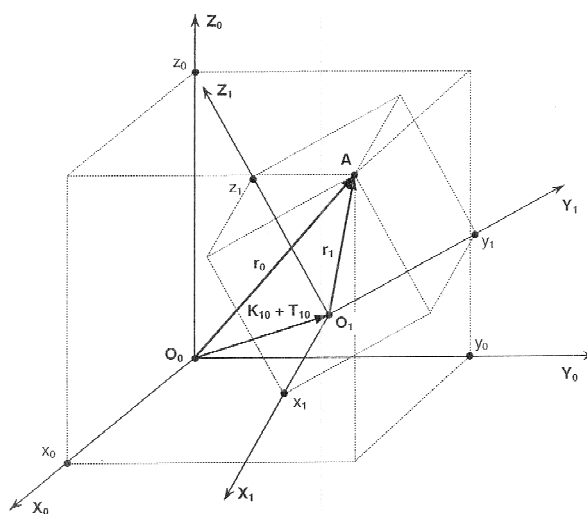
4.2.1 Přímý přístup k odvození trajektorie nástroje v souřadném systému obrobku

Následující způsob modelování pracovního prostoru je v literatuře nejčastěji uváděn a vychází z pohybu jednotlivých těles. Jeho základní myšlenkou je převedení souřadného systému nástroje přes jednotlivá tělesa až do systému obrobku. Pro modelování pracovního prostoru bude sice použit zjednodušený přístup, v této práci je pro srovnání přesto uveden a rozdíly vzhledem k použitému přístupu budou shrnuty v závěru následující kapitoly.

Na obrázku je zobrazen nejjednodušší případ – pohyb jednoho tělesa. V jeho souřadném systému S_1 je poloha bodu A určena polohovým vektorem $r_1 = [x_1, y_1, z_1]^T$. Polohový vektor r_0 v nadřazeném souřadném systému S_0 získáme z rovnice:

$$r_0 = R_{10} \cdot r_1 + T_{10} + K_{10}, \quad (4.21)$$

kde R_{10} je rotační matice nebo matice úhlových odchylek, T_{10} vektor translačního pohybu a K_{10} vektor posunutí počáteční polohy souřadného systému S_1 .

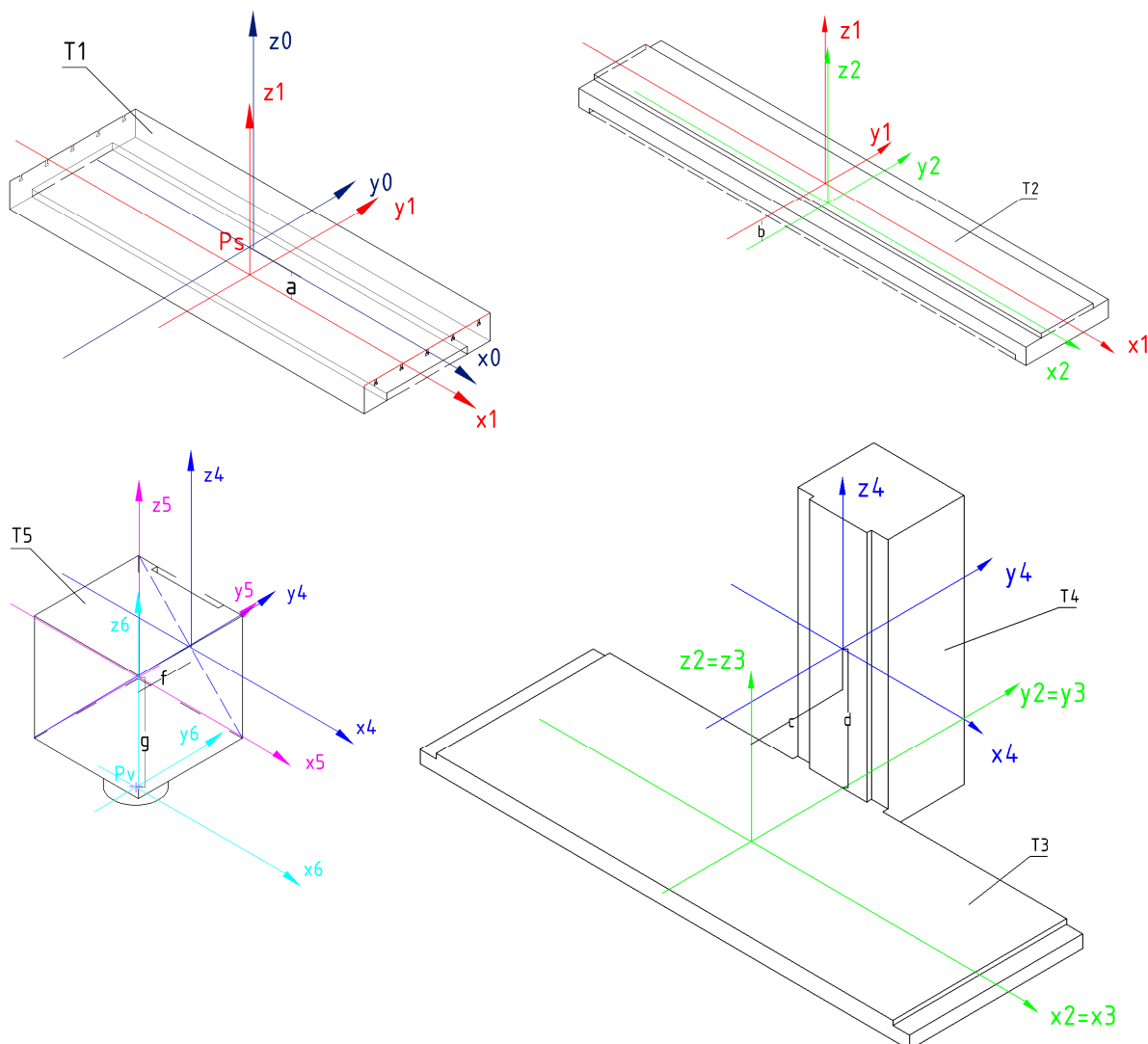


Obr. 4.7: Translační pohyb jednoho tělesa (3)

Zevšeobecněním vztahu pro n souřadných systémů vznikne rovnice, která je využita pro modelování dráhy vřetene v souřadném systému obrobku:

$$r_0 = \left(\prod_{j=1}^n R_{j+i,j} \right) r_n + \sum_{i=1}^{n-1} \left[\left(\prod_{j=1}^i R_{j,j-1} \right) (T_{i+1,i} + K_{i+1,i}) \right] + T_{10} + K_{10}. \quad (4.22)$$

Stroj je rozložen na jednotlivá funkční tělesa (T_1 - T_5) a pro každé je určen vlastní souřadný systém. Osy je vhodné ponechat orientované podle souřadného systému stroje. Je-li těleso spojeno s dalším přímočarým vedením, polohu začátku s ním spojeného tělesa určuje průsečík geometrických os vedení. V tomto bodě lze nejjednodušeji stanovit lineární a úhlová natočení (3).



Obr. 4.8: Souřadné systémy jednotlivých těles stroje

Vzájemné výchozí polohy souřadných systémů v rovnici 4.22 jsou definovány vektorem $K_{i+1,i}$:

$$K_{10}=[0,0,-a]^T \quad (4.23)$$

$$K_{21}=[0,0,-b]^T \quad (4.24)$$

$$K_{32}=[0,0,0]^T \quad (4.25)$$

$$K_{43}=[0,-c,d]^T \quad (4.26)$$

$$K_{54}=[0,f,0]^T \quad (4.27)$$

$$K_{65}=[0,0,-g]^T \quad (4.28)$$

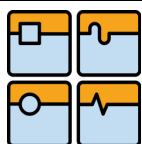
Transformační vektory přímočarých pohybů jsou vlastně posuvy stroje a jsou tedy závislé na čase:

$$T_{21}=[x(t),0,0]^T \quad (4.29)$$

$$T_{32}=[0,y(t),0]^T \quad (4.30)$$

$$T_{54}=[0,0,z(t)]^T \quad (4.31)$$

Matice R bývá obvykle k transformaci rotačních pohybů a obsahuje goniometrické funkce (uvedená např. v (3)). Může být ale použita i k transformaci úhlových



odchylek. Matice se za předpokladu malých úhlů zjednoduší do tvaru uvedeného již v kapitole 2.1:

$$R_{i+1,i} = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\varphi_{z,i+1} & \delta\varphi_{y,i+1} \\ \delta\varphi_{z,i+1} & 0 & -\delta\varphi_{x,i+1} \\ -\delta\varphi_{y,i+1} & \delta\varphi_{x,i+1} & 0 \end{bmatrix}_{(i)} \quad (4.32)$$

pro $i = 1, 2, 4$.

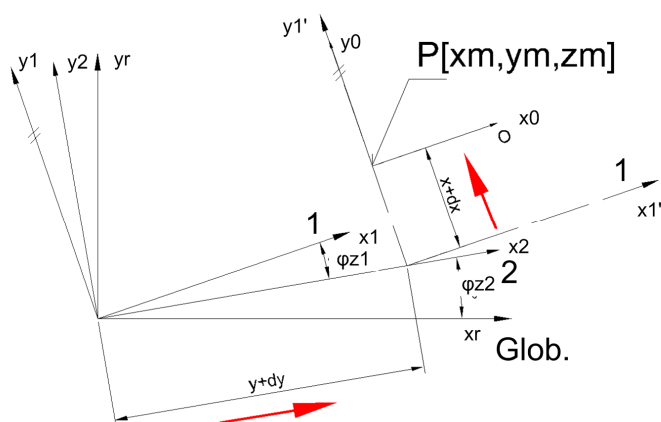
4.2.2 Inverzní přístup - stanovení natočení os a sestavení matematického popisu pracovního prostoru

Hlavní rozdíl oproti předchozímu přístupu tvorby matematického modelu je, že všechny změřené hodnoty se již vztahují k jednomu souřadnému systému (zvolený systém laser trackeru). Není proto třeba, jako v předchozím případě, převádět souřadný systém nástroje do systému obrobku.

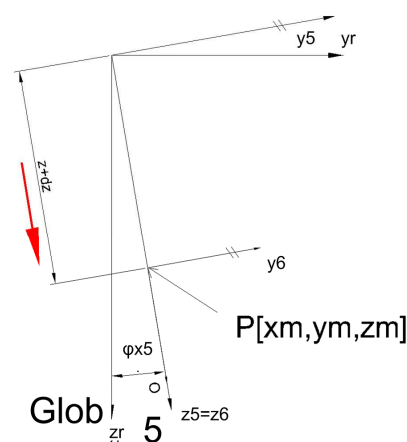
Model vedení bude pro účely práce zjednodušen. Použitým způsobem měření není totiž možné od sebe oddělit jednotlivé příčiny translačních chyb. Například translační chyba v ose z vzniká od natočení vedení stolu okolo osy x (krut), stejně jako od ohybu vedení stolu okolo osy y. V navrženém měření je snímán bod pouze na jednom rameni, a proto není možné tyto dvě chyby od sebe jednoduše oddělit.

Možným řešením by bylo stejně jako v kapitole 2.3 provést měření podruhé s reflektorem umístěným na vyšším upnutí. Metoda numerického řešení Chebychevových polynomů spadá nad rámec této práce. Krut nebude u vedení všech tří os uvažován, a tento předpoklad by měl být ověřen na datech ze skutečného měření. V modelu vedení tedy bude použit pouze sklon okolo vertikální a sklon okolo horizontální osy.

Na obrázku jsou zobrazeny souřadné systémy pro stůl a saně, resp. vlevo pro vřeteno, kvůli názornosti v rovině. Nulový bod globálního systému y_r a x_r je zachován z měření. Systém spodní části křížových saní (2) je vzhledem ke globálnímu systému, např. vinou špatné montáže, otočen o úhel φ_{z2} , resp. o úhel φ_{x2} , v druhém směru (index značí osu otáčení).

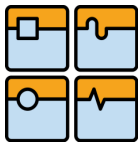


Obr. 4.9: Schéma uspořádání souřadných systémů pro křížové saně a stůl



Obr. 4.10: Schéma souřadného systému vřetene

Chce-li nyní stroj najet např. do bodu $P_0[x,y,0]$, posune se vrchní část křížových saní o vzdálenost y s chybou polohování dy. Po vrchní části saní se následně přesune o



úhel φ_{z1} otočený stůl (0) do vzdálenosti $x + dx$. Z obrázku vyplývá, že bod P_0 v referenčních souřadnicích nemá požadované souřadnice $[x, y, 0]$, ale bude laser trackerem změřen na prostorových souřadnicích $[x_m, y_m, z_m]$.

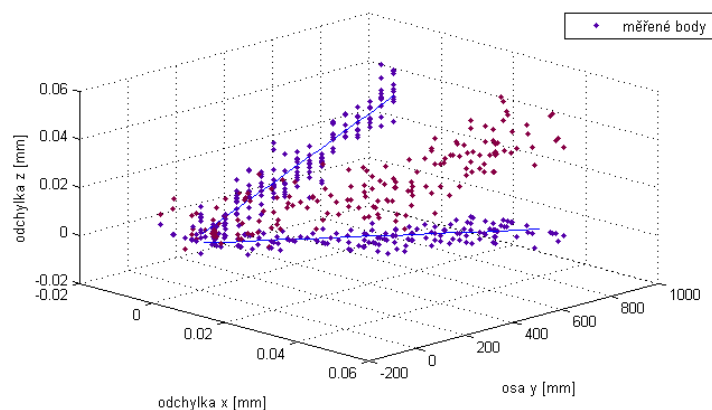
Souřadný systém vřetene (Obr. 4.10) (6) se pohybuje s vřeteníkem (5) po vedení stojanu, které má bez krutu dvě prostorové chyby φ_{x5} a φ_{y5} .

Nejprve byly stanoveny odchylky φ_{z2} a φ_{x2} křížových saní (Obr. 4.11). K tomu byla použita data z měření, kdy je stůl je v poloze $x=0$ a saně jsou polohovány v ose y . Rozhodující jsou přitom odchylky pouze ve směrech kolmých na pohyb. Díky zjednodušení jsou odchylky v kolmém směru x považovány za výsledek natočení φ_{z2} , resp. φ_{x2} , ve směru y . Uvažován je pouze lineární průběh odchylek získaný metodou nejmenších čtverců přes všechna měření. Použitelné jsou mimo přímky i polynomy vyšších stupňů, z nich by se úhel v každém bodě získal přes tečnu, resp. derivaci. Znaménko úhlu natočení je určeno pravidlem pravé ruky.

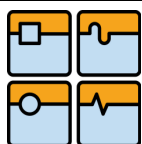
Následně jsou stejným způsobem vybrána data při poloze saní $y=0$ a určeny odchylky φ_{z1} a φ_{y1} . Data z měření vřetene není třeba vybírat, přímka je proložena všemi měřeními (úhly φ_{y5} a φ_{x5}).

Následující funkce (viz příloha A) spočte hledané úhlové odchylky. Uvedená část slouží jako příklad stanovení úhlového natočení pro vedení saní. Do funkce vstupují matice hodnot přímo z měření (Brx, Bry, Brz). Ve funkci `polyfit` jsou vybrány pouze potřebné hodnoty popsané výše a zadán stupeň prokládaného polynomu 1. Příkaz `polyval` spočte nové hodnoty z předchozí funkce a stačí jedna, aby byl určen i úhel natočení přímky.

```
function [uhelxy, uhelzy, uhelyx, uhelzx, uhelxz, uhelyz] = urceni_uhlu5(Brx, Bry, Brz)
%rovina yz
Pz=polyfit(Bry(1:170,2), Bry(1:170,3), 1);
Z2=polyval(Pz, Bry(1:170,2));
tanuhel=(Z2(170,1)/Bry(170,2));
uhelzy=atan(tanuhel); %úhel ve směru z při pohybu v ose y
% rovina yx
Px=polyfit(Bry(1:170,2), Bry(1:170,1), 1);
X2=polyval(Px, Bry(1:170,2));
tanuhel=(X2(170,1)/Bry(170,2));
uhelxy=-atan(tanuhel); %úhel ve směru x při pohybu v ose y
```



Obr. 4.11: Úhlová odchylka vedení křížových saní promítnutá do rovin XY a ZY



Za předpokladu malých úhlů je možné místo tangensu do transformační matice (2.2) dosadit samotný úhel v radiánech.

- křížové saně

$$R_{2r} = \begin{bmatrix} 1 & -\delta\varphi_{z2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \delta\varphi_{x2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

- stůl

$$R_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \delta\varphi_{z1} & 0 & 0 \\ -\delta\varphi_{y1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

- vřeteno

$$R_{5r} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \delta\varphi_{y5} \\ 0 & 0 & -\delta\varphi_{x5} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

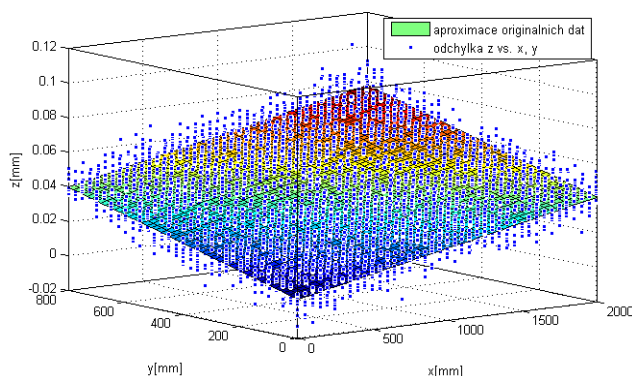
V transformačních maticích jsou použity hodnoty 1, čímž je do nich po vynásobení polohou zahrnut i translační vektor. Není jej pak třeba podle rovnice (4.22) přičítat. Transformační matice (4.33 a 4.34) jsou dosazeny do rovnice (4.22) pro pohyb stolu (v globálním systému):

$$\begin{bmatrix} x_{si} \\ y_{si} \\ z_{si} \end{bmatrix} = R_{2r} \cdot R_{12} \cdot \begin{bmatrix} xi + \delta xi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{2r} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ yi + \delta yi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

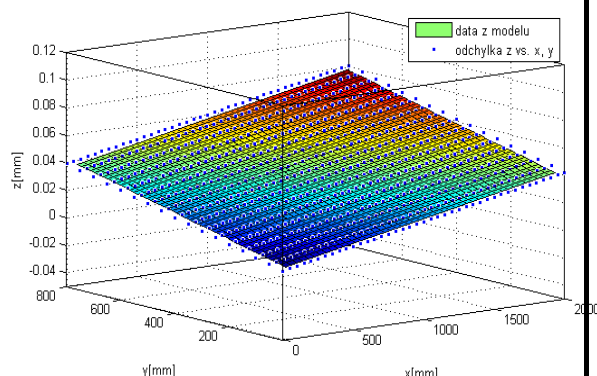
a rovnice (4.35) pro pohyb vřetene:

$$\begin{bmatrix} x_{vi} \\ y_{vi} \\ z_{vi} \end{bmatrix} = R_{5r} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ zi + \delta zi \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

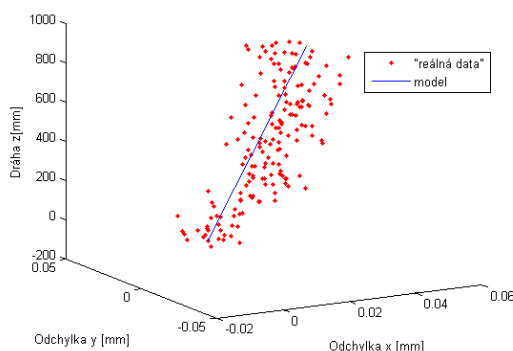
Na levé straně této rovnice je polohový vektor pro i-tý bod. Na obrázcích dole je porovnání výsledků odchylky v ose z při pohybu stolu v souřadnicích x a y. Z grafů lze usoudit, že model odpovídá původním datům dostatečně. Tato data vznikla ale uměle. Je nyní otázkou ověření, zda je model použitelný i pro reálná data.



Obr. 4.12: Originální data z pohybu stolu



Obr. 4.13: Data z modelu dráhy stolu



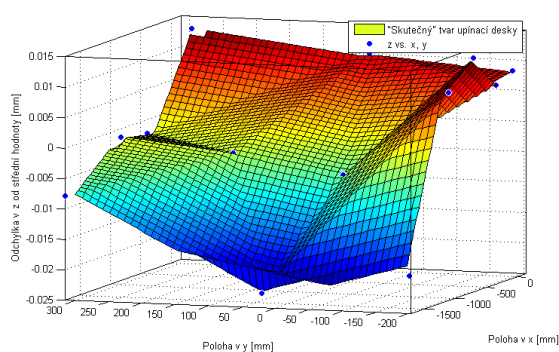
Obr. 4.14: Porovnání modelu s daty měření vřetene

V kapitole 5.2 budou vybírány body, které tvoří plochy obrobku. Funkcí `sestaveni_modelu6` (viz příloha A) jsou vytvořeny modelové body, které svým formátem odpovídají způsobu polohování reflektoru při snímání. Tím je umožněno použít stejnou funkci na vyhodnocení virtuálního obrobku jak na data z měření, tak i na data z modelu.

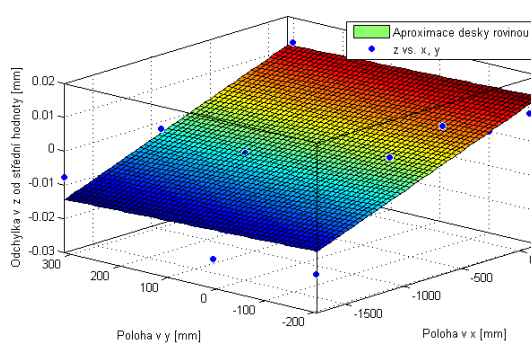
4.3 Stanovení vlivu chyby stolu na 3D síť

Upnutý obrobek bude natočen shodně s nakloněním pracovní desky. Toto natočení je možné simulovat upravením 3D sítě dat. Na obrázku (Obr. 4.15) je tvar desky získaný interpolací rovinou po částech. Rovnice tohoto tvaru jsou naprosto nevhodné pro další zpracování, a tudíž bylo přistoupeno k aproximaci. Velice dobře datům odpovídá polynom druhého řádu v obou osách, ale i ten je pro vyhodnocení upnutí obrobku příliš komplikovaný (obrobek by dosedal pouze rohy).

Nejvhodnější plochou je rovina, která navíc hrubému popisu upínací desky postačuje (Obr. 4.16).



Obr. 4.15: „Skutečný“ tvar desky



Obr. 4.16: Aproximace rovinou

Parametry roviny, která aproximuje plochu stolu, jsou:

$$\text{fitresult}(x,y) = p00 + p10 * x + p01 * y \quad (4.38)$$

$$p00 = 0.01062$$

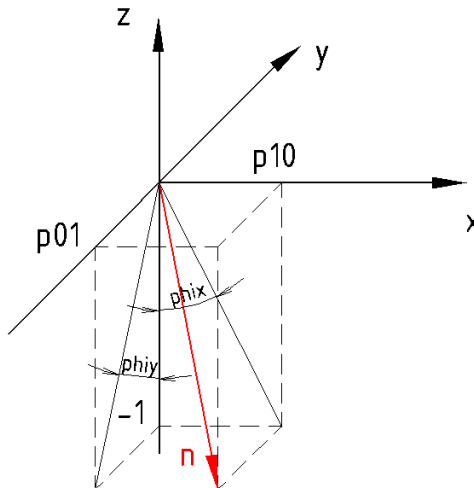
$$p10 = 1.351e-005$$

$$p01 = -4.293e-006$$

Jelikož se jedná o koeficienty obecné rovnice roviny, odpovídají tyto parametry normálnímu vektoru $n = [p10, p01, -1]^T$. Z koeficientů je zřejmé, že se jedná o téměř



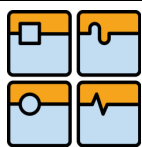
kolmý vektor. Významné budou tedy pouze odchylky ve směru x a y a místo tangens úhlů odchylek mohou být použity úhly samotné v radiánech. Na obrázku je zobrazen vektor n s jeho úhly ϕ_{ix} a ϕ_{iy} k příslušným osám.



Obr. 4.17: Normálový vektor roviny a jeho úhly

Nyní mohou být upraveny hodnoty 3D sítě, protože odchylka v daném bodě sítě bude součtem odchylky změřené a odchylky vzniklé natočením obrobku, která je přímo úměrná jeho z -ové souřadnici s koeficienty úměrnosti ϕ_{ix} a ϕ_{iy} .

```
ft = fitttype( 'poly11' );  
opts = fitoptions( ft );  
opts.Weights = zeros(1,0);  
opts.Normalize = 'on';  
[fitresult1, gof] = fit( [Brov(:,1),Brov(:,2)], Brov(:,3), ft, opts );  
Coeff=coeffvalues(fitresult1);  
phix=Coeff(2)/-1;  
phiy=Coeff(3)/-1;
```

5 Zkušební obrobek

Pro výrobce je možnost predikovat geometrické vlastnosti obrobku ještě před samotným obrobením, zvláště jedná-li se o obrobek velkých rozměrů, velice vítaná. V této kapitole je rozpracován postup k odhadnutí geometrických vlastností obrobku z hodnot měření provedených laser trackerem. Vstupní data jsou získávána jednak z měření přímo, jednak z měření nepřímo přes matematický popis obráběcího prostoru, který byl odvozen v předchozích kapitolách. Původně bylo v plánu stejný obrobek vyhotovit na stroji a porovnat s vlastnostmi odvozeného virtuálního obrobku. Protože nebyla data v požadované formě naměřena, nebylo třeba ho nakonec obrábět. V příloze je uveden jeden návrh na neuskutečněný ověřovací obrobek.

5.1 Geometrická přesnost obrobku a způsoby měření

Tvar obrobku je dán jeho hraničními plochami. Geometricky ideální tvar (jmenovitý tvar) obrobku je definován v konstrukčních výkresech a je složen z více ideálních ploch (rovina, kulová plocha, válec, kužel, anuloid). Skutečný tvar však není možné klasickým měřením definovat a až souřadnicové měřicí stroje umožnily z mnoha měřených bodů ho alespoň numericky popsat.

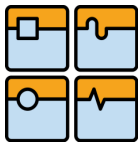
Výsledná nepřesnost vyrobené součásti je dána mnoha faktory, z nichž nejdůležitější jsou (13):

- pružné deformace soustavy stroj-nástroj-obrobek,
- teplotní dilatace,
- opotřebení nástroje,
- nepřesné seřízení stroje,
- deformace obrobku vlivem upínacích sil,
- geometrické a kinematické chyby stroje,
- vnitřní napětí v obrobku,
- kmitání,
- nehomogenita materiálu obrobku a kolísání rozměrů polotovaru.

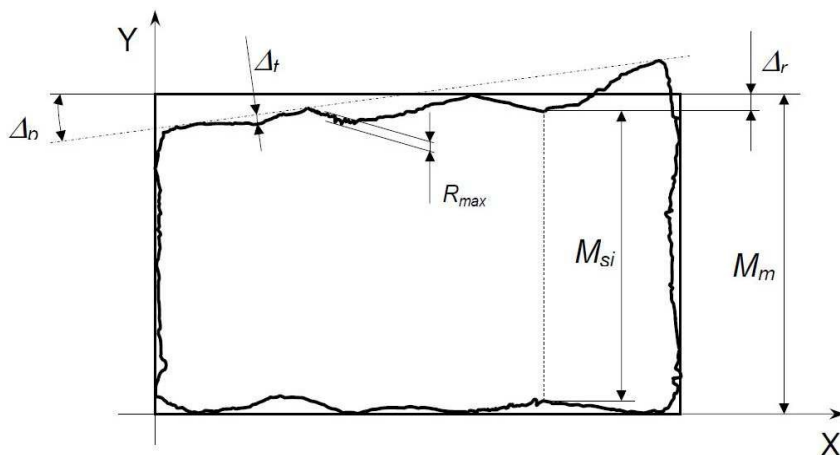
Z výsledné nepřesnosti je obtížné odlišit od sebe její jednotlivé příčiny. Velkou předností zkoušek obráběním je to, že není nutné připevňovat ke stroji snímače a přístroje a to je předurčuje k tomu, aby sloužily jako kontrola v probíhající produkci. Zkoušky probíhají pod skutečným zatížením od statických i dynamických procesních sil včetně vznikajícího tepla a reprezentují tedy skutečné provozní podmínky.

Rozměry obrobku se musí pohybovat v přípustných mezích, aby mohl plnit svou funkci. Rozdíly mezi ideální a skutečnou plochou se dají shrnout do čtyř základních skupin.

- Odchylky rozměru $[\Delta_r]$ představují rozdíl mezi skutečným M_{si} a jmenovitým rozměrem M_m .
- Odchylky $[\Delta_p]$ polohy jsou určeny nepřesností vzájemného vztahu dvou prvků (ploch, přímek, bodů).
- Drsnost povrchu $[R_{max}]$ značí velmi malé nepravidelnosti povrchu, které vznikají převážně působením nástroje.



DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obr. 5.1: Chyby skutečné plochy obrobku (13)

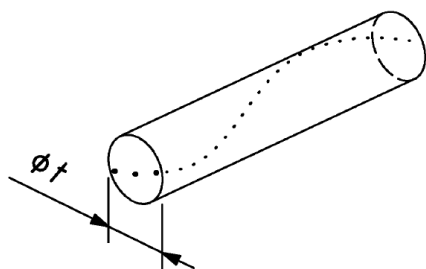
- Odchylky tvaru $[\Delta_t]$ jsou definovány rozdílem tvaru skutečné plochy vzhledem k ideální. Do této kategorie bývá zahrnována i vlnitost, často způsobená kmitáním soustavy stroj-nástroj-obrobek.

Mezi odchylky tvarové se řadí ty chyby povrchu, u kterých je poměr šířky a hloubky větší než 1 000:1. Za vlnitost jsou považovány ty odchylky, kde tento poměr činí přibližně 100:1. Při poměru menším se jedná již o drsnost povrchu (14).

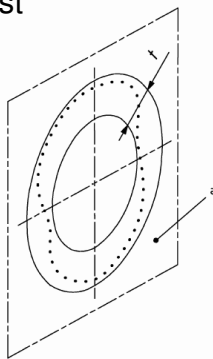
V tabulce (Tabulka 5.1) je uveden výběr geometrických tolerancí z normy ČSN ISO 1101.

Příklady geometrických tolerancí tvaru, směru a polohy

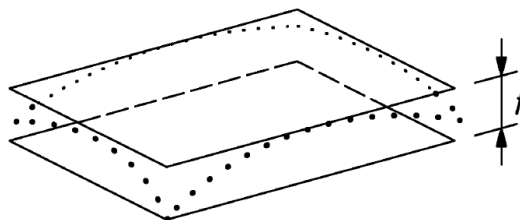
- přímost



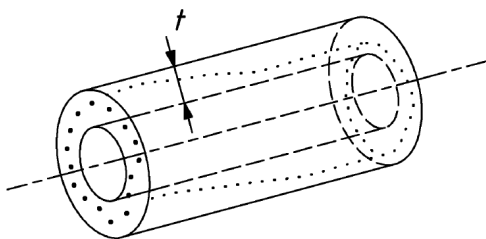
- kruhovitost



- rovinnost

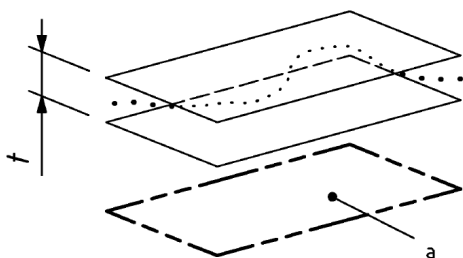


- válcovitost

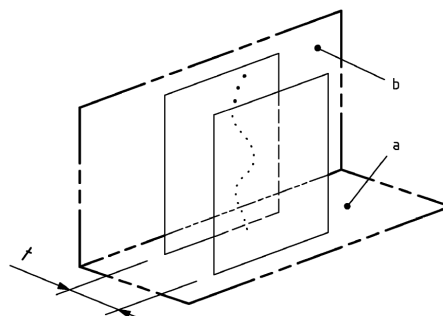




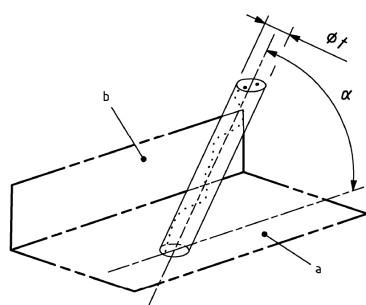
– rovnoběžnost



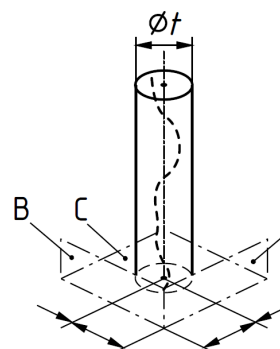
– kolmost



– šikmost



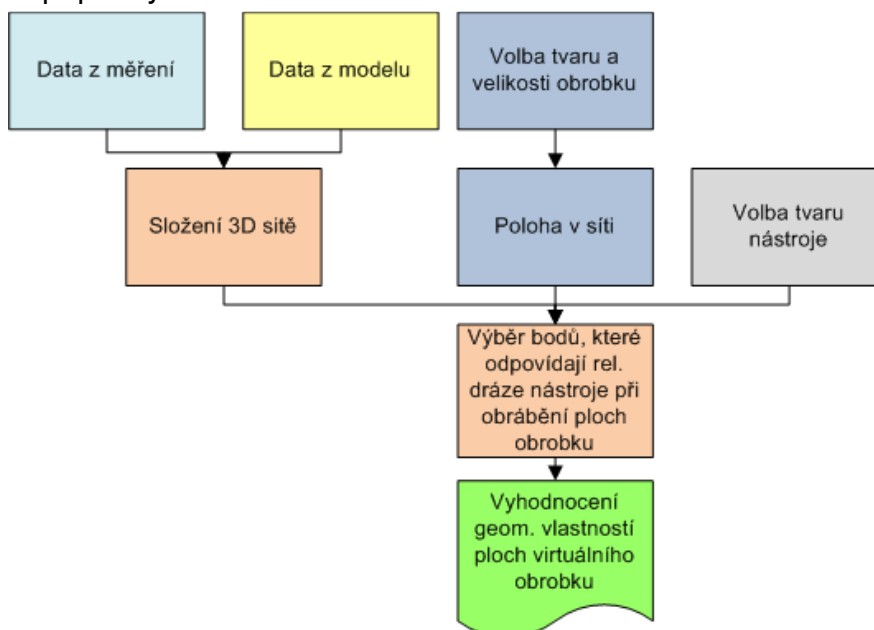
– poloha



Tabulka 5.1: Příklady geometrických tolerancí tvaru, směru a polohy

5.2 Vytvoření virtuálního obrobku

Na obrázku dole je zobrazen postup vytvoření a vyhodnocení geometrických parametrů virtuálního obrobku. Schéma obsahuje jednotlivé body, které budou v této kapitole blíže popsány.



Obr. 5.2: Schéma postupu vytvoření virtuálního obrobku

K sestavení obrobku mohou být použita jak data z měření, tak i z matematického popisu prostoru. Složením použitých 2D dat pro stůl a 1D pro vřeteno vznikne 3D síť



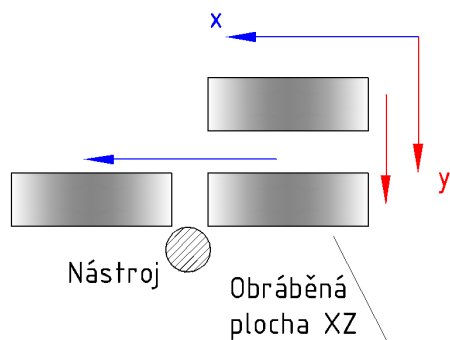
bodů. K hodnotám vřetene (ve směru x a y) je ještě přičtena odchylka způsobená nakloněním stolu (kapitola 4.3).

```
rx=Brz(:,3)*phix;  
ry=Brz(:,3)*phiy;  
Brz(:,1)=Brz(:,1)-rx;  
Brz(:,2)=Brz(:,2)-ry;
```

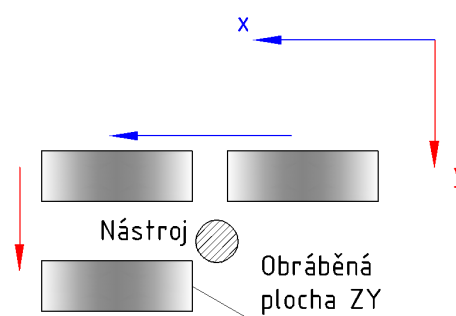
Pro výslednou odchylku v každém bodě je důležitá relativní poloha mezi stolem a nástrojem. V práci je zvolen postup, kdy jsou od souřadnic polohy vřetene odečteny souřadnice stolu. To znamená například, že má-li vřeteno v bodě [0,0,k] chybu ve směru osy y 0,05 mm a stůl v bodě [i,j,0] chybu o stejném směru a velikosti, bude výsledná chyba v ose y nulová.

Do vzniklé sítě je virtuálně vložen obrobek. Tvar obrobku je dán body, které tvoří jeho hraniční plochy. V každém bodě stolu bylo provedeno 20 měření (kladný a záporný smysl najíždění v ose x a ose y). V každém bodě vřetene bylo změřeno 10 hodnot.

Před frézováním plochy YZ předchází napolohování stolu v ose x a pohyb vůči vřetenu s nástrojem je následně ve směru osy y. Tento způsob polohování odpovídá měření, kdy bylo prováděno najíždění ve směru osy y s nastavováním v ose x. Způsob najíždění tak lze využít i při vyhodnocování přesnosti různých virtuálně opracovaných ploch. Na plochy v rovině ZX budou použita data z najíždění v ose x, na plochu YZ data z najíždění v ose y. Dráha nástroje při opracování plochy rovnoběžné s deskou stolu je závislá na obsluze CNC stroje a je proto zvolen pouze jeden směr polohování (v práci směr najíždění x).

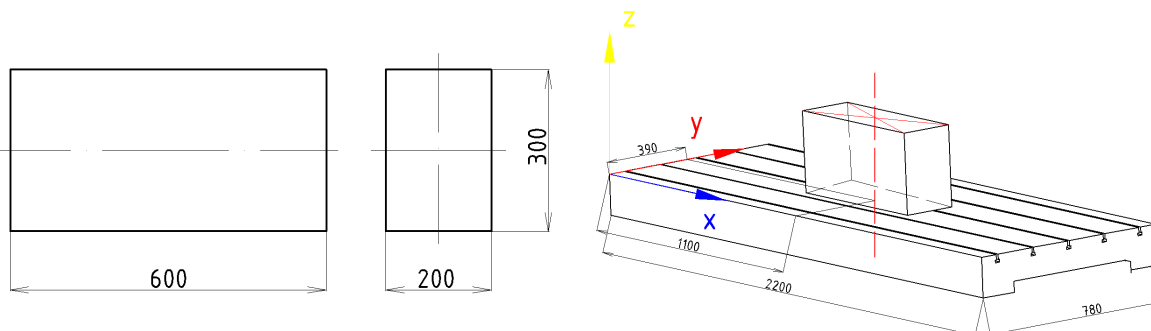


Obr. 5.3: Podobnost s měřením (najíždění x, nastavování y)



Obr. 5.4: Podobnost s měřením (najíždění y, nastavování x)

Před vytvořením ukázkového virtuálního obrobku je nutné stanovit rozměry a tvar. Protože princip vyhodnocení vlastností u všech ploch bude stále stejný, může se jednat i o tvarem jednoduchý dílec. Zvolen byl proto hranol o rozměrech 600 x 200 x 300 mm, který je umístěn symetricky na středu stolu.

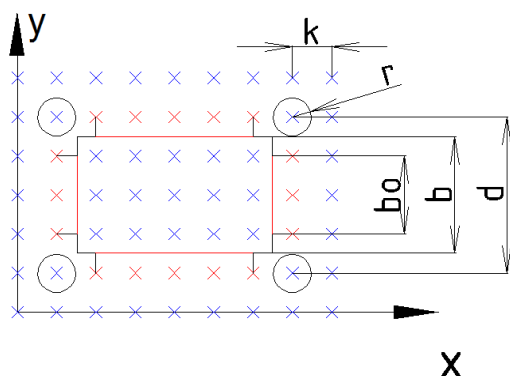


Obr. 5.5: Rozměry virtuálního obrobku a jeho poloha na stole

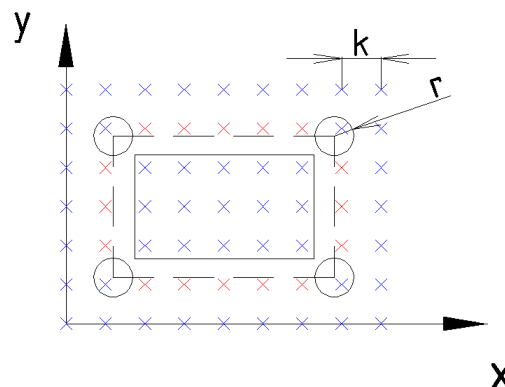


Další bod, který je třeba zmínit, je volba průměru nástroje. Velikost nástroje se totiž projevuje jako korekce trajektorie vřetene – rozměry, které vřeteno opisuje, jsou v ideálním případě větší o průměr nástroje. Střed nástroje se musí ale pohybovat v dráze dané body 3D sítě.

Na obrázku (Obr. 5.6) je zobrazen půdorys obrobku, který byl vytvořen nástrojem pohybujícím se v síti bodů. Je znázorněno první zjednodušení, které přichází na řadu, když není poloměr nástroje shodný s roztečí sítě.



Obr. 5.6: Příklad 1, kdy není shodný poloměr nástroje s roztečí sítě



Obr. 5.7: Příklad 2, kdy dráha nástroje nekopíruje body sítě

Poloha krajních bodů nástroje nemá v tomto případě pro určování přesnosti obráběné plochy b vliv, protože tato část je následně odfrézována pohybem v kolmé rovině. Předcházející bod nevytváří roh obrobku a je vůči němu posunut o vzdálenost $k - r$. To znamená, že u plochy o délce b budou známy odchylky pouze v rozsahu:

$$b_0 = b - 2(k - r), \quad (5.1)$$

přičemž nástroj se bude pohybovat po dráze, která je násobkem rozteče sítě. Je na uživateli, zda změří pro každý nástroj síť s odpovídající roztečí, nebo zda je pro něj vhodnější ji ponechat a vyhodnotit pouze vnitřní body (červeně).

Druhé zjednodušení se děje tehdy, když dráha středu nástroje při opracování obrobku neodpovídá bodům sítě (Obr. 5.7). Na obrázku je případ, kdy je obrobek menší než na Obr. 5.6. Je vidět, že vyznačená dráha nástroje neleží v bodech sítě. V tom případě je jediné řešení vybrat a vyhodnotit nejbližší body (opět červeně).

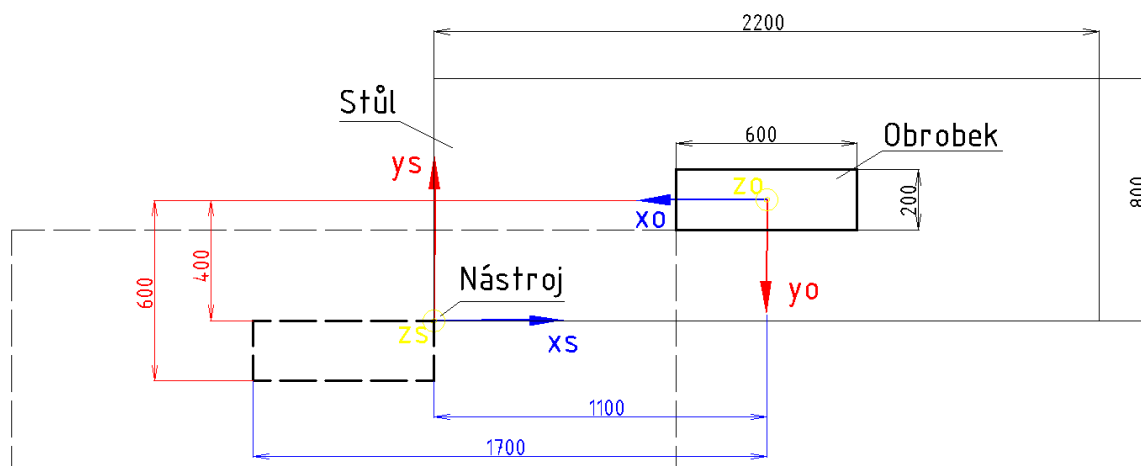
Třetí zjednodušení se týká výšky nástroje. Když je výška nástroje menší než rozteč sítě, je možné vyhodnotit odchylky oblasti dané výškou nástroje okolo úrovně bodů.

Všetchna tři zjednodušení mají za úkol převést reálnou dráhu nástroje do dráhy virtuální. Jejich vliv na samotné výsledky by však měl být zanedbatelný (geometrické odchylky se nemění skokově) a význam mají právě při sestavování virtuální dráhy. V práci je pro názornost zvolen nástroj s poloměrem od 0 do 25 mm. Pak je možné díky zjednodušením uvažovat body sítě, které odpovídají plochám obrobku bez korekce dráhy nástroje.

Nulový bod stroje leží v levém dolním rohu stolu. Souřadný systém pro data laser trackeru je umístěn v prvním bodě měření, přičemž reflektor byl připevněn na středu stolu. Proto vzniká posunutí ([1100,400,0] pro MCFV 2080) mezi počátkem souřadného systému stroje a systému měření. Navíc jsou tyto dva systémy otočeny okolo osy z o 180° . Na vyhodnocení úhlových odchylek a přesnosti polohování to vliv



nemělo žádný. Protože při určování přesnosti je však rozhodující konkrétní relativní poloha nástroje vůči stolu s obrobkem, je nutné ji přesně stanovit.



Obr. 5.8: Rozměry obrobku a umístění v souřadném systému stroje

Obrobek byl umístěn na střed stolu (Obr. 5.8), ale obecně může být po přepočtu relativní polohy stolu k nástroji jeho poloha libovolná.

Pěti opracovávaným plochám příkladového obrobku odpovídají body o souřadnicích:

Označení plochy (rovina)	x [mm]	y [mm]	z [mm]
ZX1	1 100-1 700	400	0-300
ZX2	1 100-1 700	600	0-300
YZ1	1 100	400-600	0-300
YZ2	1 700	400-600	0-300
XY	1 100-1 700	400-600	300

Dole je uveden výňatek z funkce, jejímž úkolem je vybrat všechny odpovídající body 3D sítě plochy obrobku ZX1. Pro geometrickou přesnost této plochy je relevantní pouze chyba v normálním směru plochy, tedy v ose y.

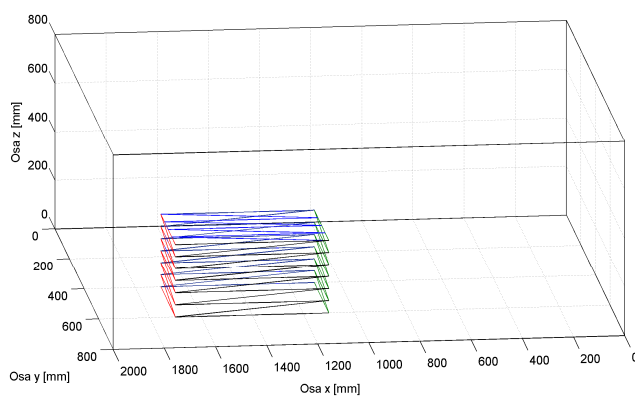
Z naměřených dat stolu byly vybrány body, jejichž souřadnice odpovídají souřadnicím stolu a vřetene, kdyby ve skutečnosti vzájemným pohybem vytvářely plochy obrobku.

Polohy stolu a vřetene byly měřeny odděleně a v každém bodě bylo provedeno 10 měření. Ve funkci je proto použito dvou cyklů for (s a r), jež mají za úkol nakombinovat všechna měření pro každý bod ($10 \cdot 10 = 100$ hodnot) a následně je ze všech kombinací určena střední hodnota a směrodatná odchylka. Pro každou plochu je sestavena matice středních hodnot bodů a následně dvě z hodnot na horní a dolní hranici intervalu pravděpodobnosti 95 % (Obr. 5.10).

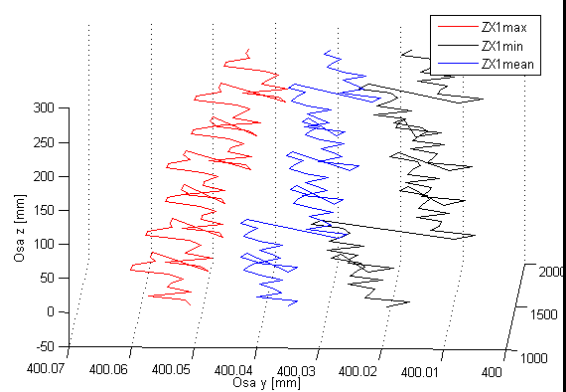
```
X=Brx(1+(2*p*xx*400/k)+2*p*1100/k:2*p+(2*p*1100/k)+(2*p*(1700-1100)/k)+  
+2*p*xx*400/k,:);  
Z=Brz(1:2*p*(1+300/k),:);  
for n=0:300/k  
    for i=0:(1700-1100)/k  
        a=1;  
        for s=1:2*p  
            for r=1:2*p  
                Mzx(a,:)=Z(s+2*p*n,:)-X(r+2*p*i,:);  
                a=a+1;  
            end  
        end  
    end  
end
```



```
end
Mzx(:,1)=-Mzx(:,1);
Mzx(:,2)=-Mzx(:,2);
Mx=Mzx(:,2)-y1;
Xmean=mean(Mzx(:,2));
si=std(Mx);
ZXlmax(b,2)=Xmean+2*si;
ZXlmax(b,1)=mean(Mzx(:,1));
ZXlmax(b,3)=mean(Mzx(:,3));
ZXlmin(b,2)=Xmean-2*si;
ZXlmin(b,1)=mean(Mzx(:,1));
ZXlmin(b,3)=mean(Mzx(:,3));
ZXlmean(b,2)=Xmean;
ZXlmean(b,1)=mean(Mzx(:,1));
ZXlmean(b,3)=mean(Mzx(:,3));
b=b+1;
end
end
```



Obr. 5.9: Body 3D sítě odpovídající dráze nástroje při obrábění ploch obrobku



Obr. 5.10: Mezní a střední rozměry plochy ZX1 (max, mean, min)

5.3 Vyhodnocení geometrických parametrů

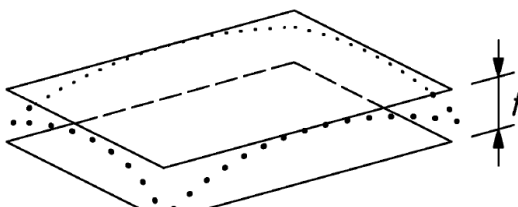
Plochy mezi body měřené sítě tvoří krychle, resp. hranoly. Šikmé, válcové či kulové plochy do této sítě umístit nelze. Parametry virtuálního obrobku, které se ze sítě dají vyhodnotit, jsou:

- rovinnost,
- rovnoběžnost,
- kolmost.

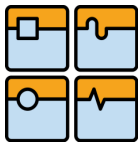
Závěrem kapitoly jsou navíc stanoveny rozměrové tolerance.

5.3.1 Rovinnost

Tolerance rovinnosti je dle normy nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, které ohraničují zkoumanou plochu.



Obr. 5.11: Tolerance rovinnosti

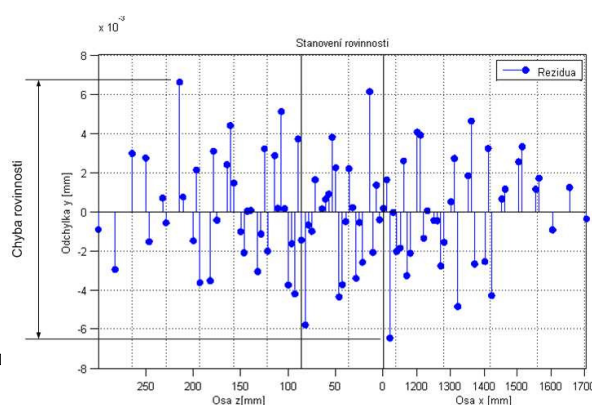
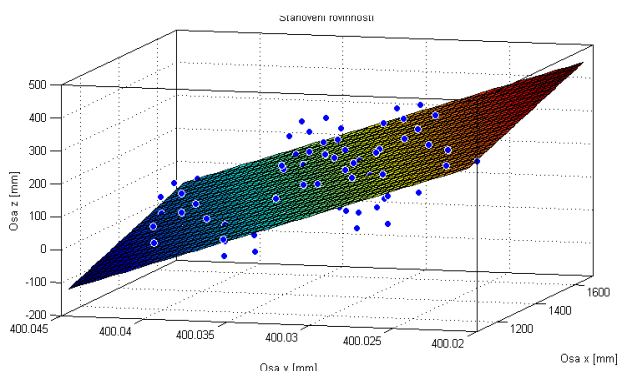


Stejné kritérium bylo využito i pro vyhodnocování rovinnosti ploch virtuálního obrobku. Nejprve je však nutné určit, k jaké rovině hodnoty bodů vztahovat. Kdyby byla použita ideální plocha krychle, nebude uvažován vliv natočení a toleranční pole rovinnosti bude výrazně větší, odpovídalo by totiž maximální a minimální rozměrové toleranci. Za vztažnou rovinu je proto použita taková plocha, která vznikne aproximací všech bodů (Obr. 5.12) a následně jsou vybrány body s největší a nejmenší odchylkou (rezidua) (Obr. 5.13) pomocí vzorce analytické geometrie:

$$v_i = \frac{|p10 * x_i + p01 * y_i - 1 * z_i + p00|}{\sqrt{p10^2 + p01^2 + p00^2}}, \quad (5.2)$$

pro i-tý bod od vztažné plochy o obecném tvaru:

$$0 = p10 * x + p01 * y - 1 * z + p00. \quad (5.3)$$



Obr. 5.12: Proložená plocha k určení rovinnosti

Obr. 5.13: Stanovení rovinnosti z rozdílů reziduí

Uvedená část funkce (viz příloha) slouží jako příklad pro plochu ZX1. Strukturou odpovídá tato funkce popsanému způsobu určování rovinnosti. Body s maximální odchylkou jsou vybírány z matice maximálních odchylek ZX1max a minimální hodnoty z matice ZX1min.

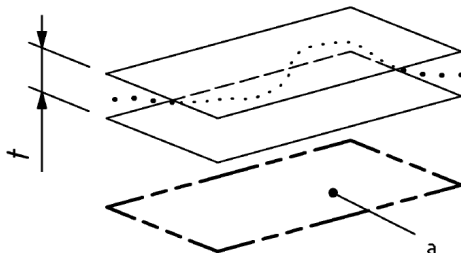
```
ft = fitttype( 'poly11' );
opts = fitoptions( ft );
[fitresult1,gof] = fit([ZX1mean(:,1),ZX1mean(:,3)],ZX1mean(:,2),ft, opts );
Coeff1=coeffvalues(fitresult1);
for b=1:length(ZX1max)
v(b,:)=abs(Coeff1(2)*ZX1max(b,1)+Coeff1(3)*ZX1max(b,2)-1*ZX1max(b,3)+
+Coeff1(1))/sqrt((Coeff1(2)^2)+(Coeff1(3)^2)+1^2);
end
vmax=max(v);
for b=1:length(ZX1min)
v(b,:)=abs(Coeff1(2)*ZX1min(b,1)+Coeff1(3)*ZX1min(b,2)+1*ZX1min(b,3)+Coeff1
(1))/sqrt((Coeff1(2)^2)+(Coeff1(3)^2)+1^2);
end
vmin=min(v);
DATA(1,1)=vmax-vmin;
```

Výsledné hodnoty rovinnosti jsou ukládány do matice DATA stejně, jako budou i následující hodnoty rovnoběžnosti a kolmosti. Její tvar a výsledky z hodnot jsou uvedeny v závěru kapitoly.



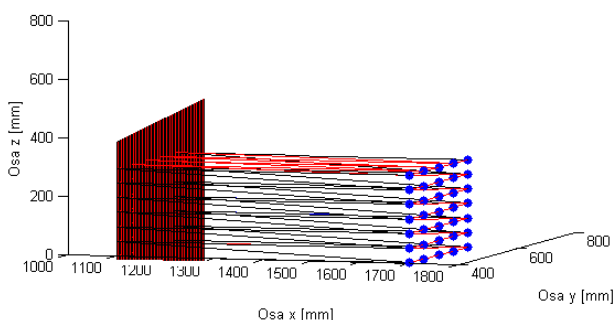
5.3.2 Rovnoběžnost

Toleranční prostor rovnoběžnosti je vymezen dvěma rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu t a rovnoběžnými se vztažnou osou.



Obr. 5.14: Tolerance rovnoběžnosti

Vyhodnocení rovnoběžnosti probíhá obdobně jako určování rovinnosti. Vztažná rovina nyní nevzniká ze samotných bodů zkoumané plochy jako v předchozím případě, nýbrž z bodů protilehlé plochy.



Obr. 5.15: Určení rovnoběžnosti bodů jedné plochy (modře) vůči vztažné rovině (červeně)

Nejprve je stanovena vztažná plocha z protilehlé strany. Ve dvou cyklech for jsou dosazeny do rovnice (5.2) matice maximálních a minimálních hodnot ($ZX1_{max}$ a $ZX1_{min}$) a z jejich extrémních hodnot je proveden rozdíl, který odpovídá toleranci rovnoběžnosti.

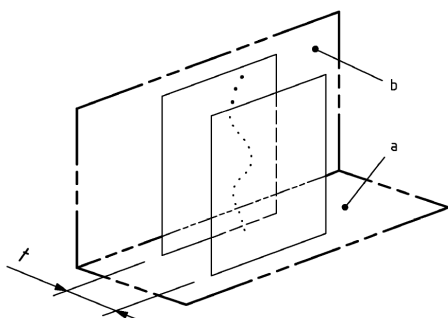
```
[fitresult1, gof] = fit([ZX2mean(:,1), ZX2mean(:,2)], ZX2mean(:,3), ft, opts);  
Coeff1=coeffvalues(fitresult1);  
for b=1:length(ZX1max)  
v(b,:)=abs(Coeff1(2)*ZX1max(b,1)+Coeff1(3)*ZX1max(b,2)-  
1*ZX1max(b,3)+Coeff1(1))/sqrt((Coeff1(2)^2)+(Coeff1(3)^2)+1^2);  
end  
vmax=max(v);  
for b=1:length(ZX1min)  
v(b,:)=abs(Coeff1(2)*ZX1min(b,1)+Coeff1(3)*ZX1min(b,2)-  
1*ZX1min(b,3)+Coeff1(1))/sqrt((Coeff1(2)^2)+(Coeff1(3)^2)+1^2);  
end  
vmin=min(v);  
DATA(2,1)=vmax-vmin;
```

Postup je použit na plochy obrobku v rovinách ZX a YZ. Rovina protilehlá ploše XY tvoří dosedací plochu obrobku. Tato plocha není obráběna a je tudíž považována za ideální. Za toleranci rovnoběžnosti této plochy pak může být považován rozdíl největší a nejmenší hodnoty ve směru osy z.



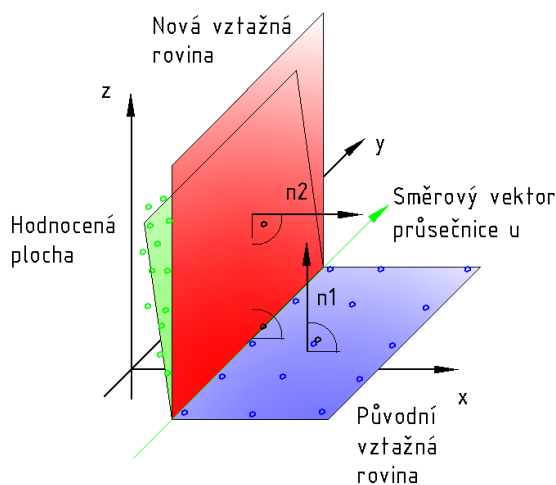
5.3.3 Tolerance kolmosti

Zde je toleranční prostor omezen dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance kolmosti a kolmými k základní vztažné rovině.



Obr. 5.16: Toleranční prostor kolmosti

Na obrázku jsou znázorněny roviny, které při určování kolmosti hrají roli. Jejich význam je vysvětlen na příkladu plochy ZX1 (hodnocená plocha) a YZ1 (původní vztažná plocha).



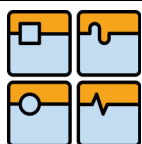
Obr. 5.17: K vysvětlení hodnocení tolerance kolmosti

Body ploch ZX1 a YZ1 jsou nejprve proloženy rovinou. Výsledkem jsou koeficienty obecného tvaru rovin (Coeff1 a Coeff2).

```
ft = fittyp('poly11');  
opts = fitoptions(ft);  
[fitresult1, gof] = fit([ZX1mean(:,1), ZX1mean(:,2)], ZX1mean(:,3), ft,  
opts);  
Coeff1 = coeffvalues(fitresult1);  
[fitresult2, gof] = fit([YZ1mean(:,1), YZ1mean(:,2)], YZ1mean(:,3), ft,  
opts);  
Coeff2 = coeffvalues(fitresult2);
```

Obě plochy leží obecně v prostoru a jejich průsečíkem je tedy přímka. Stanovení této přímky vede na soustavu dvou rovnic o třech neznámých v maticovém tvaru:

$$B \cdot D = c \quad (5.4)$$



a v rozepsaném tvaru:

$$\begin{bmatrix} p01_1 & p10_1 & -1 \\ p01_2 & p10_2 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p00_1 \\ p00_2 \end{bmatrix}. \quad (5.5)$$

Vektor D obsahuje body hledané průsečnice. Dosadí-li se postupně za x_D a z_D hodnota nula, jsou z rovnice (5.6) získány dva body (D a E), ze kterých je snadné určit směrový vektor průsečnice u .

$$D = c \cdot B^{-1} \quad (5.6)$$

Postup převedený do jazyka Matlab vypadá následovně:

```
B=[Coeff1(3),-1;Coeff2(3),-1];  
c=[Coeff1(1),Coeff2(1)]';  
D=[0,0,0]';  
D(2:3)=B\c;  
B=[Coeff1(2),Coeff1(3);Coeff2(2),Coeff2(3)];  
c=[Coeff1(1),Coeff2(1)]';  
E=[0,0,0]';  
E(1:2)=B\c;  
u=D-E;
```

Nová rovina musí být z definice kolmá na původní vztažnou plochu. Její normálový vektor ($n2$) je pak kolmý na normálový vektor původní roviny ($n1$) a na směrový vektor průsečnice (u). Ve funkci je proto k získání jejího normálového vektoru použit vektorový součin (`cross`).

$$n2 = u \times n1 \quad (5.7)$$

Způsob k získání tolerance kolmosti je ze známé nové vztažné roviny stejný jako v předchozích případech určování rovinnosti a rovnoběžnosti.

```
n=cross([Coeff2(2);Coeff2(3);-1],u);  
d=(n(1)*D(1)+n(2)*D(2)+n(3)*D(3));  
n(4)=d;  
for b=1:length(ZXlmax)  
v(b,:)=abs(n(1)*ZXlmax(b,1)+n(2)*ZXlmax(b,2)+n(3)*ZXlmax(b,3)+n(4))/sqrt((n(1)^2)+(n(2)^2)+(n(3)^2));  
end  
vmax=max(v);  
for b=1:length(ZXlmin)  
v(b,:)=abs(n(1)*ZXlmin(b,1)+n(2)*ZXlmin(b,2)+n(3)*ZXlmin(b,3)+n(4))/sqrt((n(1)^2)+(n(2)^2)+(n(3)^2));  
end  
vmin=min(v);  
DATA(3,1)=vmax-vmin;
```

5.4 Porovnání výsledků

Výsledky předchozí kapitoly jsou pro vygenerovaná data shrnuty do tabulky 5.2 a pro data získaná z modelu do tabulky 5.3. Výsledky obou pochází z uměle vytvořených dat. Nejsou proto překvapující a pouze odpovídají způsobu, jakým byla data vytvořena (zejména natočení os, viz kapitola 3.7). Nedají se z nich proto dělat závěry o přesnosti v budoucnosti vyhotoveného skutečného obrobku. Důvodem, proč jsou zde uvedeny, je to, že je na nich ukázán výstupní formát z funkce pro vyhodnocování geometrických vlastností obrobku (viz příloha).



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Ve sloupcích jsou jednotlivé posuzované plochy, v řádcích jsou pak plochy, ke kterým je geometrická tolerance (viz legenda) vztahována. Definice a způsob vyhodnocení určených tolerancí je uveden v předchozí kapitole.

Ref.	Pos.	ZX1	ZX2	YZ1	YZ2	YX
ZX1		0,018395	0,051171	0,039748	0,035297	0,040001
ZX2		0,050251	0,01846	0,035093	0,037428	0,043885
YZ1		0,059077	0,062485	0,019235	0,043151	0,056392
YZ2		0,033576	0,032717	0,045705	0,01562	0,097146
YX		0,056222	0,056514	0,056144	0,050991	0,012257

Tabulka 5.2: Výsledky předchozí kapitoly pro vygenerovaná data

Ref.	Pos.	ZX1	ZX2	YZ1	YZ2	YX
ZX1		1,06E-12	3,33E-12	0,016024	0,016024	0,016903
ZX2		1,99E-12	1,72E-12	0,016024	0,016024	0,016903
YZ1		0,02807	0,02807	2,94E-12	7,96E-12	0,05372
YZ2		0,02807	0,02807	5,91E-12	3,84E-12	0,05372
YX		0,025355	0,025355	0,026861	0,026861	1,13E-12

Tabulka 5.3: Výsledky předchozí kapitoly pro data z modelu

	rovinnost
	rovnoběžnost
	kolmost

V kapitole 4.2.2 je popsáno vytvoření matematického popisu, který byl uvažován pouze lineární. Hodnoty tolerancí ploch z něj vytvořeného tomu odpovídají (Tabulka 5.3). Plochy obrobku jsou totiž v tomto případě roviny a tolerance rovinnosti se tedy blíží nule (nula není zřejmě z důvodu numerického zpracování počítačem). K nule se blíží i hodnoty rovnoběžnosti protilehlých ploch modelu. Celkově jsou hodnoty získané z modelu nižší. Nejsou u něj totiž uvažovány jevy, jako je vůle, nepřesnost polohování či měření. Hodnoty z tohoto důvodu mají nulovou směrodatnou odchylku, a tím se v programu sestavené matice maximálních a minimálních mezí rovnají matici středních hodnot.

Tolerance rovinnosti je u ploch z vygenerovaných dat také nejnížší (Tabulka 5.2). Z popsaného způsobu jejich vytvoření vyplývá, že se vlastně také jedná s menšími odchylkami o lineární model. Hodnoty rovnoběžnosti jsou si proto velmi podobné. Tolerance kolmosti hodnocené plochy je ovlivněná jednak natočením a odchylkami vůči vztažné ploše, tak i její velikostí (na větší ploše se promítnou úhlové odchylky výrazněji).

Závěrem této kapitoly jsou uvedeny rozměry s maximálními a minimálními odchylkami jednotlivých ploch a z nich vypočtené tolerance rozměrů, které byly funkcí ukládány do matice *Rozmer*.

	ZX1	ZX2	YZ1	YZ2	YX
Maximum	400,0617	600,074	1100,0733	1700,0753	299,9975
Minimum	400,0042	600,0179	1100,0012	1700,0081	299,938
Rozměr x	max	600,0561			
	min	599,9348			
Rozměr y	max	200,0698			
	min	199,9562			
Rozměr z	max	299,9975			
	min	299,938			

Tabulka 5.4: Rozměrové tolerance virtuálního obrobku

Rozměrové tolerance obrobku jsou sestaveny z maximálních a minimálních hodnot dvou protilehlých ploch. Nemusí se vždy určovat tolerance vnějších rozměrů, stejným způsobem lze stanovit i rozměry vnitřních tvarových prvků (dutiny, drážky apod.). Jediným nutným předpokladem je, že se bude stále jednat o tvary složené z rovin rovnoběžných s osami stroje.

5.5 Zkoušky prováděné na zkušebních obrobkách

Série zkušebních obrobků měla být vyhotovena pouze jednou. Jednak by sloužila k ověření, zda navržené postupy vyhodnocování vedou k tíženému cíli a také, v jaké míře je možné predikovat výslednou přesnost obrobku z dat naměřených na stroji bez zatížení. V práci byl sestaven zjednodušený matematický popis obráběcího prostoru. I zde by bylo vhodné porovnat předpoklady s praktickými zkouškami, zejména kvůli jeho linearitě a determinismu (nezahrnuje stochastické vlivy na přesnost stroje).

Měřením testovacích obrobků obecně je teoreticky možné získat všechny údaje o přesnosti obráběcího stroje. Je-li však stroj kvůli měření odstaven, vznikají pro výrobce náklady. Vzhledem k těmto nákladům není z pravidla možné zhotovit takové množství zkušebních obrobků, aby se ze získaných dat daly identifikovat všechny systematické chyby v nich zahrnuté (10).

Zhotovování testovacích obrobků má oproti přímému měření chyb stroje tu výhodu, že jsou snáze stanoveny geometrické chyby tvaru a k určení kvality povrchu představuje dokonce jediný přístup.

5.5.1 Podmínky při měření

Zkouškami geometrické přesnosti frézovacích center se zabývá (německá) norma VDI 3441. Řezné podmínky jsou zde voleny tak, aby dynamické zatížení stroje bylo zanedbatelné. Velikost obrobku je pro všechny stroje (nezávisle na jejich velikosti) jednotná, jelikož mohou používat frézu o shodném průměru. Umístění zkušebních obrobků na pracovním stole je nutné sjednotit a doporučuje se je upevnit alespoň na dvou pozicích. Na každé pozici podmiňuje statistické vyhodnocování zhotovení alespoň pět kusů. Obecně platí získané údaje pouze pro tyto dvě pozice, avšak

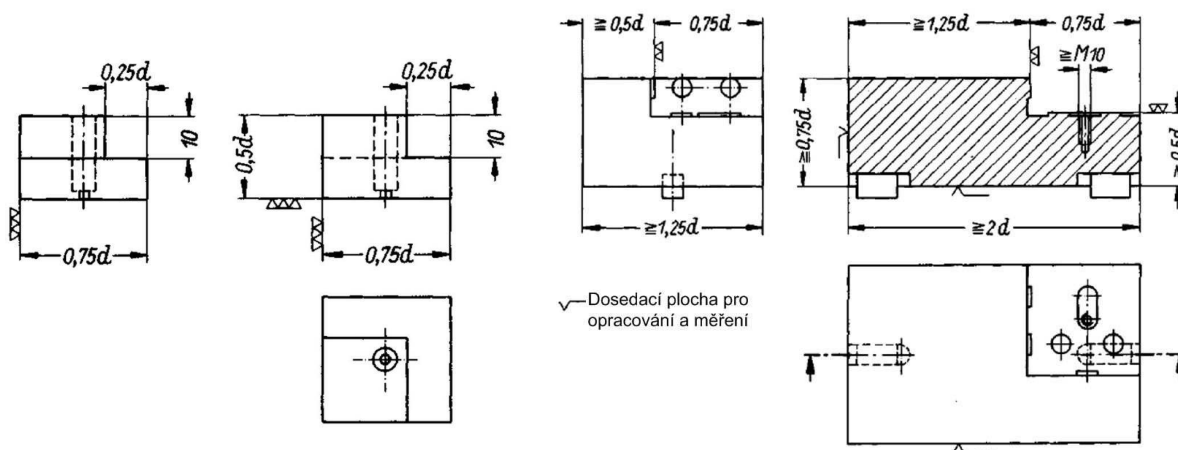
DIPLOMOVÁ PRÁCE

jejich vhodnou volbou je možné usuzovat na celý pracovní prostor. Měření jen na jedné pozici je možné, ale minimální počet obrobků je deset (15).

Použitelné jsou jak čelní, tak i rohové frézy. Výsledek měření nezávisí na průměru frézy, ten by ale neměl překračovat průměr frézovacího vřetena. Stejně tak počet zubů ani geometrii ostří norma nepředepisuje. U nového nástroje může na začátku obrábění docházet k velkému otěru, což by se projevilo ve výsledcích. Proto by s novým nástrojem mělo být provedeno před měřením několik úběrů.

5.5.2 Zkušební obrobek

Tvar doporučeného obrobku dle normy je na obrázku dole. Jeho rozměry jsou uvedeny v násobcích průměru frézy d . Vyznačené jsou základní vztažné plochy, které by měly být opracovány s rovinností do $5\text{ }\mu\text{m}$ a s kolmostí do $5\text{ }\mu\text{m}/100$. Obrobek by měl být zhotoven z oceli ČSN 41 2050 nebo z litiny ČSN 42 2425 (15). Na Obr. 5.19 jsou uvedeny rozměry upínacího přípravku pro zkušební obrobek.



Obr. 5.18: Rozměry zkušebního obrobku dle normy (10)

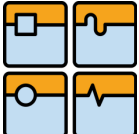
Obr. 5.19: Rozměry upínacího přípravku dle normy (10)

K ověření by byl ale samozřejmě zvolen stejný tvar jako vyhodnoceného virtuálního obrobku. Záviselo by na dohodě s výrobcem, ale je možná i varianta zhotovit dle možností nejprve zkušební obrobek a až následně vyhodnotit jeho parametry metodou popsanou v práci.

Pro oba materiály se používají následující řezné podmínky:

	ČSN 41 2050	ČSN 42 2425
řezná rychlost v	100 až 160 m/min	50 až 90 m/min
posuv na zub s_z	0,05 mm	0,05 mm
hloubka záběru a	0,5 mm	0,5 mm

Tabulka 5.5: Řezné podmínky při zkouškách (10)

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 61
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

6 Shrnutí, zobecnění a přínos práce

6.1 Shrnutí

Existuje mnoho měřidel a ještě více způsobů jejich použití ke stanovení geometrické přesnosti obráběcích strojů. Žádné však nelze srovnávat s univerzálností laser trackeru. Jeho limitující nevýhoda – nízká přesnost – byla hlavní důvod, proč nebyl doposud výrazněji v oblasti geometrické přesnosti obráběcích strojů uplatněn. Postupným technickým vývojem tato překážka odpadá a je přirozené, že se výrobci a uživatelé strojů snaží objevit všechny způsoby jeho uplatnění. Jedním z nich je právě i společnost TOSHULIN, jež laser tracker vlastní a na jejíž popud práce vznikala.

Výrobci strojů jsou schopni změřit a znají geometrické odchylky pohybových os stroje. Měří je totiž při montáži klasickými způsoby uvedenými v normě. Metoda navrhnutá v této práci využívá toho, že je laser tracker schopen provést všechna měření v jediném souřadném systému. I když je možné stanovit odchylky jednotlivých os jako v klasickém případě, právě jeden souřadný systém umožňuje stanovit relativní odchylku nástroje vzhledem k odchylce obrobku upnutému na stolu. Relativní odchylka je rozhodující faktor výsledné přesnosti obrobků. Použitá metoda nevychází z jednotlivých odchylek jednotlivých os. Z dat laser trackeru je možné pomocí funkcí vyvinutých v této práci prakticky ihned zmapovat odchylky pracovního prostoru. Cílem metody pak bylo do vzniklé mapy umístit a virtuálně opracovat obrobek.

V kapitole 2 jsou v první části (podkapitola 2.1) shrnuty důvody vzniku geometrických chyb a odvození jejich matematického tvaru. Tento tvar byl totiž využit při sestavení popisu pracovního prostoru, který byl dále využit. V podkapitole 0 jsou pro srovnání shrnuty aktuální možnosti měření geometrické přesnosti. Dosud nejpoužívanější a nejpresnější je zatím laserinterferometr. Jeho největší nevýhodou oproti laser trackeru je, že měří z principu odchylky pouze v jednom směru. Před měřením více os je nutné ho pokaždé znovu nastavit a jeho souřadný systém, který je dán jedním bodem, se tak mění. V části 2.3 bylo popsáno zatím nejpokrokovější využití laser trackeru při měření obráběcích strojů.

Nebylo možné navázat na předchozí práce, použití laser trackeru je nové a nebylo dosud v podobné formě publikováno. Jediné ze zadání vyplývající požadavky byly ty, že bude muset být proměřen pohyb vřetene a stolu. Vše ostatní bylo sestaveno originálně pro tuto práci. Kapitola 3 shrnuje všechny body, které hrají roli při návrhu měření. Je v ní rozebrána poloha trackeru, volba souřadného systému a plán měřených bodů. Bylo také navrženo měření rovinnosti upínací desky. Pro potřeby měření zajistila společnost TOSHULIN vlastní stroj, ne však jeho odpovídající obsluhu. Naměřit se tak podařilo pouze ve formě, kterou nebylo možné v práci dále využít. Byla popsáním způsobem vytvořena umělá data, jež by svojí formou a tvarem odpovídala metodou navrhnutému měření.

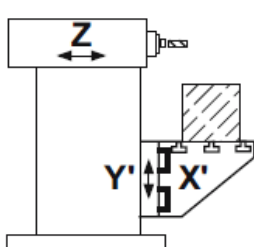
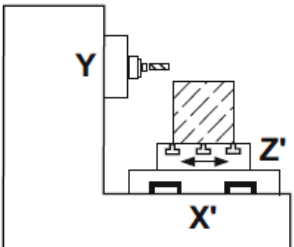
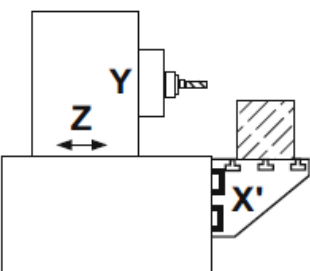
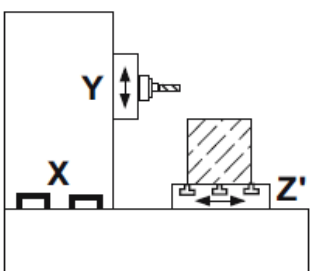
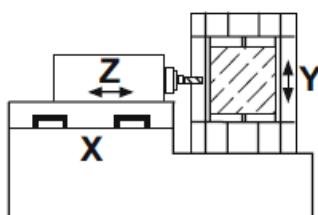
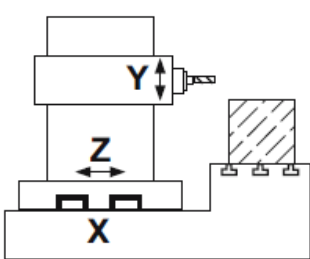
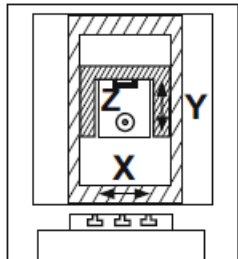
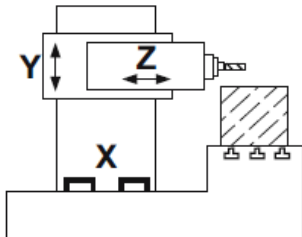
Na uměle vytvořená data navazuje kapitola 4, ve které je navrženo zpracování výsledků měření, a to zejména pro sestavení matematického popisu pracovního prostoru. V první části je provedeno stanovení parametrů přesnosti polohování, které metoda umožňuje a je vysvětleno a ukázáno sestavení popisu prostoru klasickým způsobem. Dále jsou ve zjednodušené formě z dat určeny úhlové odchylky natočení

vedení, které jsou společně s průměrnou dvoustrannou úchylkou v polohách dosazeny do nově sestaveného vlastního matematického popisu.

V následující kapitole 5 byl popsán výběr hodnot ze sítě bodů, ze kterých je virtuální obrobek sestaven. Body jsou vybírány nejen podle tvaru obrobku, ale i podle velikosti nástroje. Jako vstupní data byla použita jak data přímo z měření, tak i z v předešlé kapitole odvozeného popisu pracovního prostoru. Hodnoty sítě jsou upraveny tak, že zahrnují natočení upínací desky stolu. Na jednoduchém tvaru krychle byl demonstrován postup vyhodnocení geometrických parametrů ploch (rovinnost, rovnoběžnost, kolmost), který je použitelný za daných podmínek i na plochy kteréhokoli jiného obrobku.

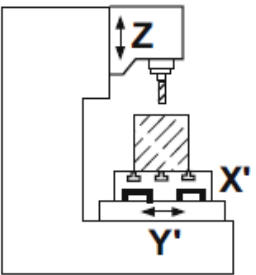
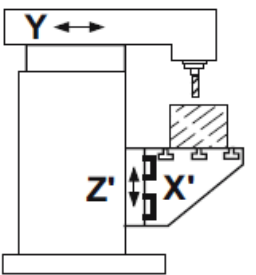
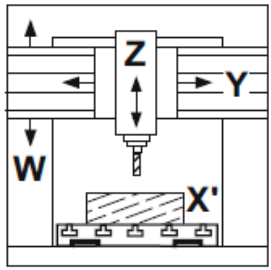
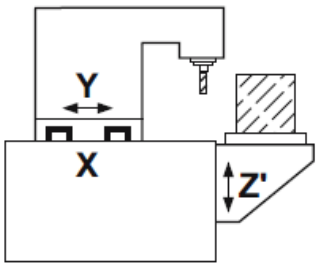
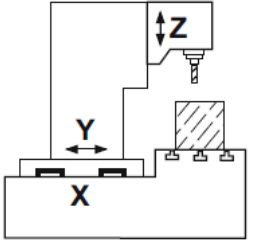
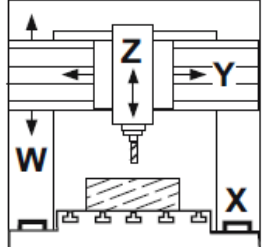
6.2 Zobecnění použité metody na další typy strojů

Metoda byla navržena pro tříosé vertikální obráběcí centrum MCFV 2080. Obecně je ale bez problémů možné použít stejné principy a dokonce stejné programy k vyhodnocení i na centra s odlišnou konfigurací os. V práci nebyla řešena přítomnost rotační osy a bez další práce v tomto tématu zůstává použitelnost metody pouze na tříosá centra – horizontální (Tabulka 6.1) i vertikální (Tabulka 6.2).

Počet os v nástroji	jedna			X – osa nástroje X' – osa obrobku
	dvě			
	tři			

Tabulka 6.1: Možné konfigurace os horizontálních center (16)

MCFV 2080 je centrum s konfigurací jedna osa nástroje a dvě osy obrobku (červeně). Jsou-li osy rozděleny takto na nástroj a obrobek, je možné osy a jejich odchylky považovat za na sobě nezávislé (1. a 2. řádky tabulek). Plán měření pak může zůstat zachován. Pouze při měření horizontálních center bude s vřetenem najížděno podobně jako se stolem vertikálních strojů.

Počet os v nástroji	jedna			X – osa nástroje X' – osa obrobku
	dvě			
	tři			

Tabulka 6.2: Možné konfigurace os vertikálních center (16)

Zůstává otázkou ověření na zkušebním stroji, jakým způsobem proměřit pracovní prostor center, u kterých jsou všechny tři pohybové osy tvořeny nástrojem. Nezávislost všech tří os a jejich odchylek již není v tomto případě dost dobře prokazatelná. Při prvním měření by zcela jistě přišlo na řadu projetí nástroje celým prostorem a to by bylo proveditelné pouze velice zjednodušeným způsobem vzhledem k velkému počtu bodů. Ukáže-li se chyba některé z os nezávislá na poloze ostatních, bude možné použít postup uvedený v této práci.

6.3 Přínos práce

V diplomové práci je sestaven originální způsob měření pracovní přesnosti obráběcích strojů pomocí laser trackeru. Podobné měření nebylo dosud nikde publikováno a jedná se tedy o čistě vlastní invenci. Navrhnutá metoda měření vyhodnocování umožňuje stanovit obvyklou přesnost polohování. Hlavním cílem metody je však určování geometrických parametrů obrobku, který by se případně ve změřeném prostoru obráběl. Metoda používá nejen data přímo z měření, ale využívá i matematický popis.

Funkčnost navrhnutého postupu nemohla být odzkoušena. Bude tedy první otázkou další práce navrhnuté měření a vyhodnocení provést a následně otestovat na skutečně obrobené součásti.

Hlavní nevýhodou navrhnutého měření, které by mohlo do jisté míry ovlivnit získané výsledky, je to, že se jedná čistě o zjišťování geometrické přesnosti bez zatížení.



Poté, co by byla funkčnost metody ověřena v dokončovacích podmínkách obrábění, by mohlo být proto navrženo měření s měnícím se způsobem a velikostí zatížení (statického, dynamického i teplotního). Také je otázkou odzkoušení, zda je zdiskretizování pracovního prostoru dostatečné, či zda je možné z dvou sousedních bodů interpolací usuzovat na velikost odchylky bodu mezi nimi. Tento fakt by mohl do velké míry snížit nároky na měření a zároveň by umožnil stanovování i zbylých geometrických vlastností (viz kapitola 5.1).

Uvedená diplomová práce stojí teprve na začátku dlouhé trati, na jejímž konci by mohlo být shromáždění databáze všech strojů výrobce, která by mohla být používána již přímo při kontaktu se zákazníky. Zákazník by předal CAD model součásti, kterou potřebuje vyrobit, a výrobce by ji umístil do programu spolupracujícího s databází. Pouze by vybral několik parametrů (nástroj, umístění součásti, materiál) a okamžitě by získal všechny údaje o geometrických vlastnostech, z nichž by usoudil, který jeho stroj a v jakých tolerancích dokáže součást vyrobit. Co nejspíše zůstane nevyřešeno, je stanovení struktury povrchu, která bude muset být změřena jinými prostředky.

6.4 Zusammenfassung

In der Diplomarbeit wurde eine neue Methode der Messung einer Werkzeugmaschine mithilfe eines Lasertrackers entwickelt, mit dem Hauptziel, nicht nur geometrische Eigenschaften zu bestimmen, sondern die geometrische Toleranzen des zu bearbeitenden Werkstückes vorher abschätzen zu können. Diese Aufgabenstellung kommt von dem Hersteller TOSHULIN, der zu den Weltherstellern von Karusseldrehmaschinen gehört.

Im ersten Teil des Kapitels 2 wurden die Entstehungsgründe geometrischer Fehler zusammengefasst und ihre mathematische Beschreibung wurde angeführt. Die Beschreibung wird in der Arbeit später für Bildung eines Modells der gemessenen Maschine genutzt. Des Weiteren wurden die für die Messung der geometrischen Eigenschaften bislang eingesetzten Methoden und Messgeräte aufgezählt, mit dem Ziel, sie einem Lasertracker gegenüberzustellen. Projekt *Volumetric Accuracy for Large Machine Tools* wurde als Stand der Technik eingeführt.

Es gibt in der Praxis viele Messgeräte, die zur Messung des geometrischen Verhaltens eingesetzt werden. Ein Lasertracker hatte bisher niedrige Genauigkeit, aber dieser Nachteil wird stetig entfernt. Die Methode der Messung einer Werkzeugmaschine mit einem Lasertracker wurde bislang nicht veröffentlicht. Es handelt sich um ein ganz neues Verfahren, das für die Diplomarbeit zusammengestellt wurde.

Aus dem Maschinenpark von TOSHULIN wurde das senkrechte dreiachsige Bearbeitungszentrum MCFV 2080 von TAJMAC-ZPS gewählt. Diese Maschine hat keine rotierende Achse, die die nachfolgende Verarbeitung der Daten erschweren würde, was auch ein Teil der Aufgabenstellung war.



Abbildung 6.1: Die gemessene Maschine MCFV 2080 (12)



Abbildung 6.2: Lasertracker API (5)

Die Grundlage des vorgeschlagenen Messungsteiles der Methode wurden anhand ISO 230-2 gebildet, in der zur Ermittlung der Abweichungen längs des teilweisen oder gesamten Verfahrensweges aller Achsen eine Anzahl von Messpositionen angenommen wird. Die Abweichungen der Achse x und der Achse y können untereinander abhängig sein, deshalb wird aus den Messpunkten des Tisches ein Netz gebaut (Abbildung 6.3). Die Messpunkte der Spindel werden üblich nach der ISO 230-2 eingefahren (Abbildung 6.4).

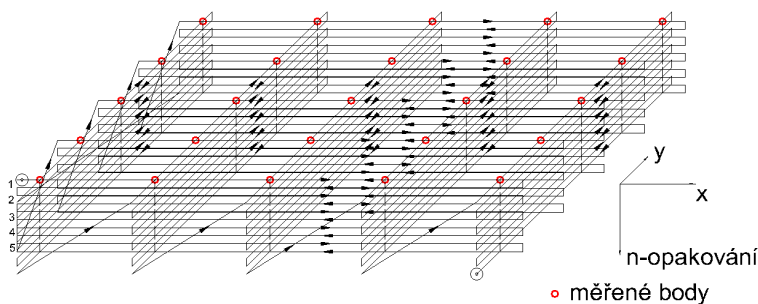


Abbildung 6.3: Die Messpunkte des Tisches

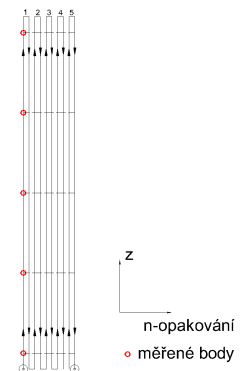


Abbildung 6.4: Die Messpunkte der Spindel

Die beiden Messungen werden in ein 3D Netz zusammengefügt. Des Weiteren wird auch die Ebenheit der Einspannplatte ermittelt, um das 3D Netz der Punkte anpassen zu können (Kapitel 3.6). Aus dieser Messung kommen die einzigen Ergebnisse her, die konnten in der Arbeit verwendet werden. Die ersten zwei vorgeschlagenen Messverfahren könnten leider wegen eines Bedieners des Bearbeitungszentrums nicht gewünscht durchgeführt werden. Deshalb wurden in der Arbeit Kunstdaten erschafft, die zur weiteren Vorführung der Bearbeitung eingesetzt wurden.

Die Bearbeitung fing mit der klassischen Ermittlung der Parameter von Positionierungsgenauigkeit nach der Norm ISO 230-2 (Kapitel 4.1) an.

Die Aufgabenstellung der Diplomarbeit ist es, aus den gemessenen Daten ein virtuelles Werkstück an der Maschine zu bearbeiten und seine geometrischen Eigenschaften zu ermitteln. Zwei Herantreten wurden an die Aufgabe angebracht - reine Messdaten und Daten aus einem mathematischen Modell.

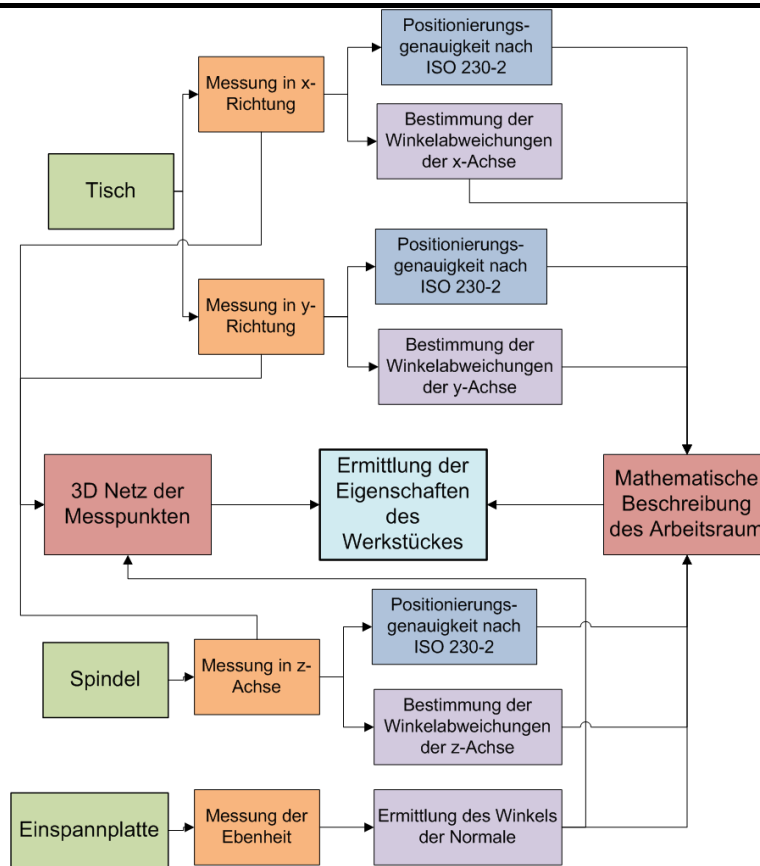
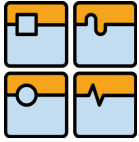


Abbildung 6.5: Entwurf der Vorgangsweise der Methode

Das Model hat den Vorteil, dass die Menge der notwendigen Eingangsdaten für seine Bildung wesentlich kleiner ist. Wenn sich zeigt, dass das Model für die Beschreibung der Fehler im Arbeitsraum ausreichend ist, könnten die nachfolgenden Messungen sparsamer sein.

Die Bildung von den klassischen mathematischen Modellen wurde im Kapitel 4.2.1 zusammengefasst.

Für den Bedarf der Arbeit wurde aber das eingesetzte Model vereinfacht, denn es nur ein Koordinatensystem des Lasertrackers gibt und Torsion nicht nachgedacht wurde. Die Winkel, die in den Rotationsmatrizen sind (Gleichungen 4.33-5), wurden aus den Punkten der Messung gewonnen (Abbildung 4.11). Die Positionsvektoren enthalten neben den Sollpositionen noch die systematische Abweichung, die nach der Norm ermittelt wurde. Die Trajektorie dann konnte für den Tisch:

$$\begin{bmatrix} x_{si} \\ y_{si} \\ z_{si} \end{bmatrix} = R_{2r} \cdot R_{12} \cdot \begin{bmatrix} xi + \delta xi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_{2r} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ yi + \delta yi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

und für die Spindel:

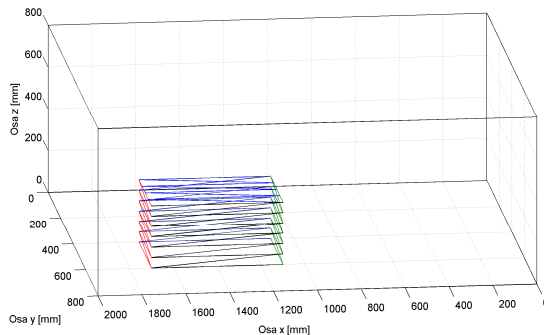
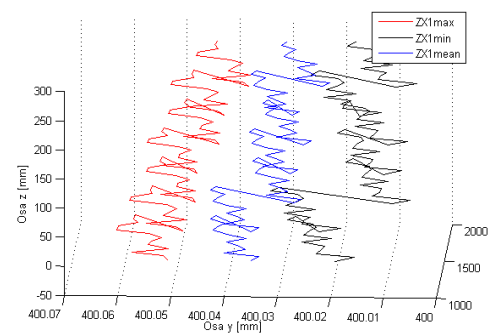
$$\begin{bmatrix} x_{vi} \\ y_{vi} \\ z_{vi} \end{bmatrix} = R_{5r} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ zi + \delta zi \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

ausgedrückt werden.

Im Kapitel 5.1 wurde die geometrische Genauigkeit eines Werkstückes allgemein beschrieben. Im nächsten Kapitel wurde ein Werkstück in Form eines Quaders aufgestellt. Die Punkte der Flächen des virtuellen Werkstückes wurden sowohl aus



den künstlichen Messpunkten als auch den Modeldaten mit Berücksichtigung seiner Lage und des eingesetzten Werkzeuges ausgesucht. Für jeden Punkt wurden alle Kombinationen der entsprechenden Messungen von der Spindel und von dem Tisch angenommen. Für jede Fläche wurden nachfolgend drei Matrizen erschafft – eine mit mittleren Werten und zwei mit 95% Intervallgrenzen.

**Abbildung 6.6: Die Flächen des Werkstückes****Abbildung 6.7: Die maximalen und minimalen Grenze einer Fläche**

Die Punkte bilden eine quadratische Form, daher die Parameter, die ermittelt werden konnten, waren Ebenheit, Parallelität und Rechtwinkligkeit (Kapitel 5.3). Welche interpolierte Bezugsebene wurde benutzt, lag daran, was für eine geometrische Toleranz ermittelt wurde. Es wurde jeweils die einfache Gleichung

$$v_i = \frac{|p10 * x_i + p01 * y_i - 1 * z_i + p00|}{\sqrt{p10^2 + p01^2 + p00^2}}, \quad (6.3)$$

eingesetzt, mit Koeffizienten der verwendeten Bezugsebene.

Die in der Arbeit erstellten Programme speichern die Parameter der geometrischen Toleranzen in eine Tabelle (die Tabelle 5.2 wurde aus Kunstdaten und die Tabelle 5.3 aus Modeldaten zusammengestellt). Die Tabelle 5.4 wird auch aus dem Programm bekommen und fasst die dimensional Toleranzen des Werkstückes um.

Die Ergebnisse konnten nicht aus gemessenen Daten entstehen. Die Funktionalität der Methode und der Programme wurde aber vorgemacht. Jetzt ist an den weiteren Arbeiten in diesem Bereich die Methode bei einer realen Messung anzuwenden und mit einem wirklich bearbeiteten Werkstück zu vergleichen. Wenn sich zeigt, dass die Nutzung der mathematischen Beschreibung eines Arbeitsraumes ausreichend ist, konnten die weiteren Messungen wesentlich verkürzt werden.

Vorliegende Arbeit ist die erste von weiteren, die für wirkliche praktische Anwendung nötig sind. Die verwendete Methode ist bis auf weiteres mit linearen Achsen begrenzt. Es sollte auch an den realen Messdaten versucht werden, eine Interpolation zwischen Messpunkten nachzuprüfen, denn dies würde auch zum Einsatz auf andere Formen der Flächen führen.

Die Vorstellung für die Zukunft ist, aus allen Maschinen einer Firma ganze Messdatenbasis zusammenzustellen, mit der ein Program mitarbeiten würde. Mithilfe dieses Programms könnte die Firma ein von Kunde spezifizierten Werkstück in den Arbeitsraum einer oder allen Maschinen platzieren und sie würde sofort wissen, mit welcher Maschine und mit welchen geometrischen Toleranzen sie den herzustellenden Werkstück bearbeiten könnte.



Příloha A Programy

1 Vytvoření ideálních bodů

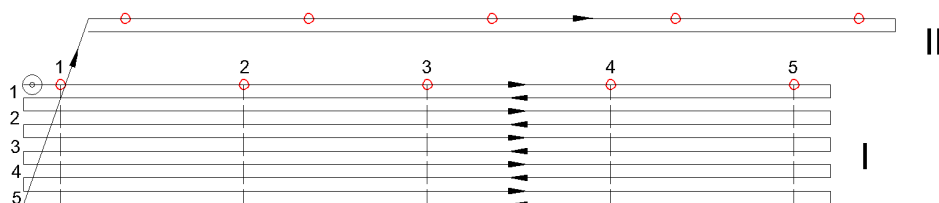
Funkce `idealni_body1` vytváří ze zadaných rozměrů pracovního prostoru (matice M [$x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}$]) dráhu stolu (matice B [x, y, z]), která je podrobně popsána v kapitole 3.4. Vzdálenost mezi body je určena krokem k . V této funkci je možné stanovit i počet cyklů. Funkci je možno použít jak na směr najíždění v ose x (stůl), tak i přehozením sloupců matice B pro směr y (křížové saně). V podřazeném cyklu `for` je vytvořena dráha pro jedno nastavení křížových saní, v nadřazeném cyklu je pak to samé provedeno pro všechna nastavení saní. V poslední části je vytvořena dráha v ose z .

```
function [ Bx, By, Bz ] = idealni_body1( M,k,p )
a=0;
m=M/k;
    for j=0:k:M(1,2)
        for i=1:p
            Bx(a+1:m(1,1)+1+a,1)=0:k:M(1,1);
            Bx(a+1:m(1,1)+1+a,2)=j;
            Bx(a+1:m(1,1)+1+a,3)=0;
            a=a+m(1,1)+1;
            Bx(a+1:m(1,1)+1+a,1)=M(1,1):-k:0;
            Bx(a+1:m(1,1)+1+a,2)=j;
            Bx(a+1:m(1,1)+1+a,3)=0;
            a=a+m(1,1)+1;
        end
    end
a=0;
g(1,2)=M(1,1);
M(1,1)=M(1,2);
M(1,2)=g(1,2);
m=M/k;
    for j=0:k:M(1,2)
        for i=1:p
            By(a+1:m(1,1)+1+a,2)=0:k:M(1,1);
            By(a+1:m(1,1)+1+a,1)=j;
            By(a+1:m(1,1)+1+a,3)=0;
            a=a+m(1,1)+1;
            By(a+1:m(1,1)+1+a,2)=M(1,1):-k:0;
            By(a+1:m(1,1)+1+a,1)=j;
            By(a+1:m(1,1)+1+a,3)=0;
            a=a+m(1,1)+1;
        end
    end
a=0;
    for i=1:p
        Bz(a+1:m(1,3)+1+a,3)=0:k:M(1,3);
        Bz(a+1:m(1,3)+1+a,1)=0;
        Bz(a+1:m(1,3)+1+a,2)=0;
        a=a+m(1,3)+1;
        Bz(a+1:m(1,3)+1+a,3)=M(1,1):-k:0;
        Bz(a+1:m(1,3)+1+a,1)=0;
        Bz(a+1:m(1,3)+1+a,2)=0;
        a=a+m(1,3)+1;
    end
end
```



2 Seřazení bodů

Pro další zpracování naměřených hodnot je třeba matici B získanou z předchozí funkce dále upravit. K tomu slouží funkce `serazeni2`, která řadí prvky měření stolu následovně (viz Obr. 6.1) do nové matice Bs:



Obr. 6.1: Vysvětlení číslování k tabulce

- Nejprve seřadí měření (1-5) z kladného směru pro první bod (červeně) a první nastavení saní (I).
- Následují měření (1-5) ze záporného směru opět pro první bod a první nastavení saní.
- To samé pro všechny body (1-5).
- To stejné pro všechna nastavení saní (I, II, ...).

Funkce řadí stejným způsobem i najíždění ve směru křížových saní y a najíždění vřetene.

```
function [ Bsx, Bsy, Bsz ] = serazeni2( By,Bx,Bz,p,M,k )
a=1;
r=1+M(1,1)/k; %pocet radku mezi stejnými body x
s=1+M(1,2)/k; %y
t=1+M(1,3)/k; %z
%% serazeni matice Bx
for f=0:s-1
    for j=1:r % j-ty bod v ose
        for i=0:p-1 %i-te opakovani
            Bsx(a,:)=Bx(f*p*r*2+j+i*2*r,:);
            a=a+1;
        end
        for i=0:p-1
            Bsx(a,:)=Bx(f*2*p*r+2*r*(i+1)-j+1,:);
            a=a+1;
        end
    end
end
a=1;
%% serazeni matice By
for f=0:r-1
    for j=1:s % j-ty bod v ose
        for i=0:p-1 %i-te opakovani
            Bsy(a,:)=By(f*p*s*2+j+i*2*s,:);
            a=a+1;
        end
        for i=0:p-1
            Bsy(a,:)=By(f*2*p*s+2*s*(i+1)-j+1,:);
            a=a+1;
        end
    end
end
a=1;
%% serazeni matice Bz
for j=1:t % j-ty bod v ose
```



```
for i=0:p-1 %i-te opakovani
    Bsz(a,:)=Bz(j+i*2*t,:);
    a=a+1;
end
for i=0:p-1
    Bsz(a,:)=Bz(2*t*(i+1)-j+1,:);
    a=a+1;
end
end
end
```

3 Generátor odchylek

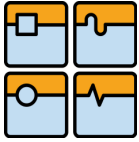
Nyní přichází na řadu vygenerování odchylek (funkce `gen_odchylek3`). K problému šlo přistoupit různými způsoby. V úvahu přicházela možnost jednoduše „zašumět“ matici *Bs* funkcí v Matlabu *rand* nebo *random*. První generuje náhodné číslo mezi 0 a 1 s rovnoměrně rozloženou hustotou pravděpodobnosti, druhá s možností zvolit typ rozdělení a jeho parametry. Jednoduché použití na data by však nebylo názorné vzhledem k tomu, že s rostoucím počtem měřených bodů a cyklů by se průměrná hodnota bodů blížila nule, popř. zadané střední hodnotě u funkce *random*. Bylo proto zvoleno, přistoupit ke generovaným odchylkám sofistikovaněji, aby co možná nejvíce odpovídaly reálnému stroji.

Vstupními parametry funkce `gen_odchylek3` je matice *Bs* získaná předchozí funkcí, rozměry pracovního prostoru v matici *M*, maximální chyba vedení *r*, počet cyklů *p*, krok *k* a velikost vůle *v*. Model v generátoru vychází z toho, že nejprve superponuje třídimenzionální chybu vedení stolu s třídimenzionální chybou vedení křížových saní. Obě tyto chyby vedení byly generovány funkcí *rand* a seřazeny podle velikosti, což má simulovat tendenci způsobenou nepřesným upevněním vedení.

Jelikož byla na datech posuzována mimo jiné necitlivost v poloze (resp. vůle), je obsažena také v modelu. Generována byla opět funkcí *rand* s možností zvolit její velikost a byla uvažována pro každý bod jiná vlivem případné chyby stoupání kuličkového šroubu.

Poslední složkou celkové chyby je nepřesnost vlivem použitého měřidla – laser trackeru. Tuto chybu reprezentuje funkce *random* s normálním rozdělením, jehož střední hodnota je nula a směrodatná úchylka odvozená z prospektu výrobce je 0,006 μm .

```
function [ Brx, Bry, Brz, RX, RY, RZ ] = gen_odchylek3( Bsx, Bsy, Bsz, M, r, p, k, v )
%% vytvori nejprve nulovou matici odchylek
Br=zeros(size(Bsx));
Rx=zeros(size(Bsx));
Ry=zeros(size(Bsx));
Rvx=zeros(size(Bsx));
Rvy=zeros(size(Bsx));
Rm=zeros(size(Bsx));
x=1+M(1,1)/k; %pocet bodu v ose x
y=1+M(1,2)/k; %pocet bodu v ose y
z=1+M(1,3)/k; %pocet bodu v ose y
S=size(Bsx);
%% chyby v ose x pri najizdeni v x
ux=(2*r)*rand(x,S(2));
unx=sort(ux); % 5x3
for jjj=0:y-1 %cyklus, který nasledujici dva zopakuju pro kazde nastaveni y
    for j=0:x-1 %cyklus, který kazdemu bodu x priradi odchylku
        for jj=1:p*2 %cyklus, který kazdemu opakovani priradi stejnou odchylku
            Rx(jjj*p*2*x+j*p*2+jj,:)=unx(j+1,:);
        end
    end
end
```



DIPLOMOVÁ PRÁCE

```
end
%% chyby v ose y pri najizdeni v x
uy=(2*r)*rand(y,S(2));
uny=sort(uy); % 5x3
for j=0:y-1 %cyklus, který kazdemu bodu x priradi odchylku
    for jj=1:p*2*x %cyklus, který kazdemu opakovani priradi stejnou odchylku
        Ry(j*p*2*x+jj,:)=uny(j+1,:);
    end
end
%% vule mezi smery najizdeni osy x
vx=-v*rand(x*2,1);
for jjj=0:x-1 %vule bude prirazena jenom jednomu smeru
    for j=0:y-1
        for jjjj=1:p
            Rvx(jjj*p*2+j*p*2*x+jjjj,1)=vx(jjj+1,1);
        end
    end
end
%% nepresnost trackeru
Rm=random('norm',0,0.006,S(1),S(2));
%% celkova chyba
Brx=Bsx+Rx+Ry+Rvx+Rm;
RX=Rx+Ry+Rvx+Rm;
%% vule mezi smery najizdeni osy y
vy=-v*rand(y*2,1);
for jjj=0:y-1 %vule bude prirazena jenom smeru najizdeni
    for j=0:x-1
        for jjjj=1:p
            Rvy(jjj*p*2+j*p*2*y+jjjj,2)=vy(jjj+1,1);
        end
    end
end
%% prirazeni stejných odchylek vedeni stejným bodem
for i=1:S(1)
    for j=1:S(1)
        if Bsx(i,1)==Bsy(j,1)&& Bsx(i,2)==Bsy(j,2)&&Bsx(i,3)==Bsy(j,3)
            Rxy(j,:)=Rx(i,:);
            Ryy(j,:)=Ry(i,:);
        end
    end
end
%% nepresnost trackeru
Rmy=random('norm',0,0.006,S(1),S(2)); %stredni hodnota nula, smerodatna odchylka 0.006
Bry=Bsy+Rvy+Ryy+Rxy+Rmy;
RY=Rvy+Ryy+Rxy+Rmy;

%% chyby osy z
S=size(Bsz);
uz=(2*r)*rand(z,S(2));
unz=sort(uz);
for j=0:z-1 %cyklus, který kazdemu bodu z priradi odchylku
    for jj=1:p*2 %cyklus, který kazdemu opakovani priradi stejnou odchylku
        Rz(j*p*2+jj,:)=unz(j+1,:);
    end
end
%% vule mezi smery najizdeni osy z
vz=-v*rand(z*2,1);
%vule bude prirazena jenom jednomu smeru
for j=0:z-1
    for jjjj=1:p
        Rvz(j*2*p+jjjj,3)=vz(j+1,1);
    end
end
Rvz(z*2*p,3)=0;
%% nepresnost trackeru
Rm=random('norm',0,0.006,S(1),S(2));
```



```
%% celkova chyba  
Brz=Bsz+Rz+Rvz+Rm;  
RZ=Rz+Rvz+Rm;  
end
```

4 Přesnost polohování

Následuje funkce na vyhodnocování přesnosti polohování (uvedena verze pro najíždění v x, ale platí i pro y). Do funkce vstupuje matice odchylek RX a matice Bsx, která slouží pouze k přiřazení souřadnic k jednotlivým řádkům výsledné matice parametrů Bxi. Číslo před každým parametrem značí číslo sloupce výsledné matice.

```
function [ Bxi ] = vyhodnoceni4( M,k,p,RX, Bsx )  
x=1+M(1)/k;  
y=1+M(2)/k;  
xi=zeros(p,1);  
Bsx(:,4)=0;  
for i=1:x*y  
    Bxi(i,:)=Bsx((i-1)*p*2+1,:); %zapisovaci matice  
end  
%% 4 průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze-kladny smer x  
for k=0:y-1  
    for i=0:x-1  
        for j=1:p  
            xi(j,1)=RX(k*x*p*2+ i*p*2+j);  
        end  
        Xi(k*x+i+1,4)=mean(xi);  
    end  
end  
Bxi=Bxi+Xi;  
Xi=0;  
%% 5 průměrná jednostranná polohová úchylka v poloze-zaporny smer x  
for k=0:y-1  
    for i=0:x-1  
        for j=1:p  
            xi(j,1)=RX(k*x*p*2+ i*p*2+j+p);  
        end  
        Xi(k*x+i+1,5)=mean(xi);  
    end  
end  
Bxi(:,5)=0; Bxi=Bxi+Xi; Xi=0;  
%% 6 průměrná dvoustranná polohová úchylka v poloze- osa x  
for k=1:x*y  
    Xi(k,6)=(Bxi(k,4)+Bxi(k,5))/2;  
end  
Bxi(:,6)=0; Bxi=Bxi+Xi; Xi=0;  
%% 7 necitlivost v poloze x  
for k=1:x*y  
    Xi(k,7)=Bxi(k,4)-Bxi(k,5);  
end  
Bxi(:,7)=0; Bxi=Bxi+Xi; Xi=0;  
%% 8 necitlivost v ose x  
for k=0:y-1  
    if abs(max(Bxi(1+k*x:x*k+x,7)))>abs(min(Bxi(1+k*x:x*k+x,7)))  
        Xi(1+k*x,8)=max(Bxi(1+k*x:x*k+x,7));  
    else  
        Xi(1+k*x,8)=min(Bxi(1+k*x:x*k+x,7));  
    end  
end  
Xi(x*y,8)=0;Bxi(:,8)=0; Bxi=Bxi+Xi; Xi=0;  
%% 9 prumerna necitlivost v ose x  
for k=0:y-1  
    Xi(1+k*x,9)=mean(Bxi(1+k*x:x*k+x,7));  
end
```



DIPLOMOVÁ PRÁCE

```
Xi(x*y,9)=0;BXi(:,9)=0; BXi=BXi+Xi; Xi=0;
xi=0;
%% 10 odhad jednostranne standardní nejistoty nastavení polohy v poloze- kladny
smer
for k=0:y-1
    for i=0:x-1
        for j=1:p
            xi(j,1)=RX(k*x*p*2+ i*p*2+j,1);
            xii=(xi(j,1)-BXi(1+i+x*k,4));
            xi(j,1)=xii^2;
        end
        Xi(k*x+i+1,10)=sqrt(sum(xi)/(p-1));
    end
end
BXi(:,10)=0;BXi=BXi+Xi; Xi=0; xi=0;
%% 11 odhad jednostranne standardní nejistoty nastavení polohy v poloze-zaporny
smer
for k=0:y-1
    for i=0:x-1
        for j=1:p
            xi(j,1)=RX(k*x*p*2+ i*p*2+j+p,1);
            xii=(xi(j,1)-BXi(1+i+x*k,5));
            xi(j,1)=xii^2;
        end
        Xi(k*x+i+1,11)=sqrt(sum(xi)/(p-1));
    end
end
BXi(:,11)=0;BXi=BXi+Xi; Xi=0; xi=0;
%% 12 jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze-kladny smer
for k=1:x*y
    Xi(k,12)=4*BXi(k,10);
end
%% 13 jednostranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze- zaporny smer
for k=1:x*y
    Xi(k,13)=4*BXi(k,11);
end
BXi(:,12:13)=0;BXi=BXi+Xi; Xi=0; xi=0;
%% 14 dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v poloze
BXi(:,14)=max(2*BXi(:,10)+2*BXi(:,11)+abs(BXi(:,7)),max(BXi(:,12),BXi(:,13)));
%% 15 jednostranna opakovatelnost nastavení polohy v ose-kladny smer
for k=0:y-1
    Xi(1+k*x,15)=max(BXi(1+k*x:x*k+x,12));
end
Xi(x*y,15)=0;BXi(:,15)=0; BXi=BXi+Xi; Xi=0;
%% 16 jednostranna opakovatelnost nastavení polohy v ose-zaporny smer
for k=0:y-1
    Xi(1+k*x,16)=max(BXi(1+k*x:x*k+x,13));
end
Xi(x*y,16)=0;BXi(:,16)=0; BXi=BXi+Xi; Xi=0;
%% 17 dvoustranná opakovatelnost nastavení polohy v ose
for k=0:y-1
    Xi(1+k*x,17)=max(BXi(1+k*x:x*k+x,14));
end
Xi(x*y,17)=0;BXi(:,17)=0; BXi=BXi+Xi; Xi=0;
%% 18 jednostranná systematická polohová úchylka v ose- kladny smer
for k=0:y-1
    Xi(1+k*x,18)=max(BXi(1+k*x:x*k+x,4))-min(BXi(1+k*x:x*k+x,4));
end
Xi(x*y,18)=0;BXi(:,18)=0; BXi=BXi+Xi; Xi=0;
%% 19 jednostranná systematická polohová úchylka v ose- zaporny smer
for k=0:y-1
    Xi(1+k*x,19)=max(BXi(1+k*x:x*k+x,5))-min(BXi(1+k*x:x*k+x,5));
end
Xi(x*y,19)=0;BXi(:,19)=0; BXi=BXi+Xi; Xi=0;
%% 20 dvoustranná systematická polohová úchylka v ose
for k=0:y-1
```




```
Xi(1+k*x,20)=max(max(BXi(1+k*x:x*k+x,5)),max(BXi(1+k*x:x*k+x,4)))-  
min(min(BXi(1+k*x:x*k+x,5)),min(BXi(1+k*x:x*k+x,4)));  
end  
Xi(x*y,20)=0; BXi(:,20)=0; BXi=BXi+Xi; Xi=0;  
%% 21 průměrná dvoustranná polohová úchylka v ose  
for k=0:y-1  
Xi(1+k*x,21)=max(BXi(1+k*x:x*k+x,6))-min(BXi(1+k*x:x*k+x,6));  
end  
Xi(x*y,21)=0; BXi(:,21)=0; BXi=BXi+Xi; Xi=0;  
%% 22 jednostranná přesnost nastavení polohy v ose- kladný smer  
for k=0:y-1  
Xi(1+k*x,22)=max(BXi(1+k*x:x*k+x,4)+2*BXi(1+k*x:x*k+x,10))-  
min(BXi(1+k*x:x*k+x,4)+2*BXi(1+k*x:x*k+x,10));  
end  
Xi(x*y,22)=0; BXi(:,22)=0; BXi=BXi+Xi; Xi=0;  
%% 23 jednostranná přesnost nastavení polohy v ose- záporný smer  
for k=0:y-1  
Xi(1+k*x,23)=max(BXi(1+k*x:x*k+x,5)+2*BXi(1+k*x:x*k+x,11))-  
min(BXi(1+k*x:x*k+x,5)+2*BXi(1+k*x:x*k+x,11));  
end  
Xi(x*y,23)=0; BXi(:,23)=0; BXi=BXi+Xi; Xi=0;  
%% 24 dvoustranná přesnost nastavení polohy v ose  
for k=0:y-1  
Xi(1+k*x,24)=max(max(BXi(1+k*x:x*k+x,4)+2*BXi(1+k*x:x*k+x,10)),max(BXi(1+k*x:x*k+x,  
5)+2*BXi(1+k*x:x*k+x,11)))-  
min(min(BXi(1+k*x:x*k+x,4)+2*BXi(1+k*x:x*k+x,10)),min(BXi(1+k*x:x*k+x,5)+2*BXi(1+k*  
x:x*k+x,11)));  
end  
Xi(x*y,24)=0; BXi(:,24)=0; BXi=BXi+Xi; Xi=0;  
end
```

5 Stanovení úhlů pro vytvoření popisu pracovního prostoru

Následující funkce určuje úhly natočení vedení způsobem popsáným v kapitole 4.2.2.

```
function [ uhelxy,uhelzy,uhelyx,uhelzx,uhelxz, uhelyz ] = urceni_uhlu5( Brx,Bry,  
Brz )  
%% natoceni sani  
%rovina yz  
Pz=polyfit(Bry(1:170,2),Bry(1:170,3),1);  
Z2=polyval(Pz,Bry(1:170,2));  
tanuhel=(Z2(170,1)/Bry(170,2));  
uhelzy=atan(tanuhel); %uhel ve smeru z pri pohybu v y  
% rovina yx  
Px=polyfit(Bry(1:170,2),Bry(1:170,1),1);  
X2=polyval(Px,Bry(1:170,2));  
tanuhel=(X2(170,1)/Bry(170,2));  
uhelxy=-atan(tanuhel);  
%% natoceni stolu  
% rovina xz  
Pz=polyfit(Brx(1:410,1),Brx(1:410,3),1);  
Z1=polyval(Pz,Brx(1:410,1));  
tanuhel=(Z1(410,1)/Brx(410,1));  
uhelzx=-atan(tanuhel);  
% rovina xy  
Py=polyfit(Brx(1:410,1),Brx(1:410,2),1);  
Y1=polyval(Py,Brx(1:410,1));  
tanuhel=(Y1(410,1)/Brx(410,1));  
uhelyx=atan(tanuhel);  
uhelyx=-uhelyx+uhelxy;  
%% natoceni vretene  
% rovina zx  
Px=polyfit(Brz(1:170,3),Brz(1:170,1),1);  
X3=polyval(Px,Brz(1:170,3));  
tanuhel=(X3(170,1)/Brz(170,3));  
uhelzx=atan(tanuhel);  
% rovina zy  
Py=polyfit(Brz(1:170,3),Brz(1:170,2),1);
```



```
Y3=polyval(Py,Brz(1:170,3));  
tanuhel=(Y3(170,1)/Brz(170,3));  
uhelyz=-atan(tanuhel);
```

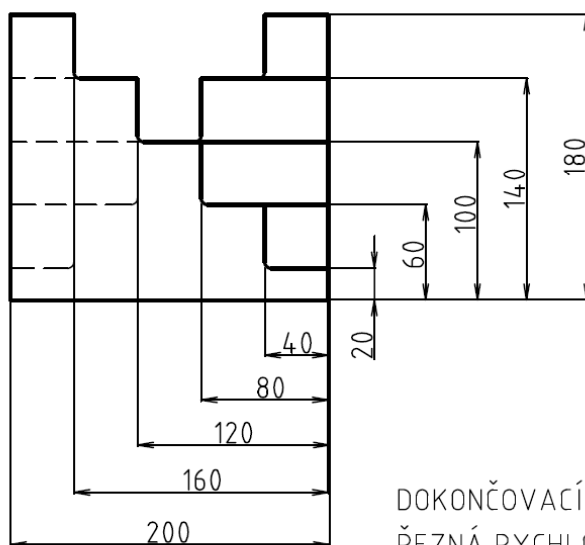
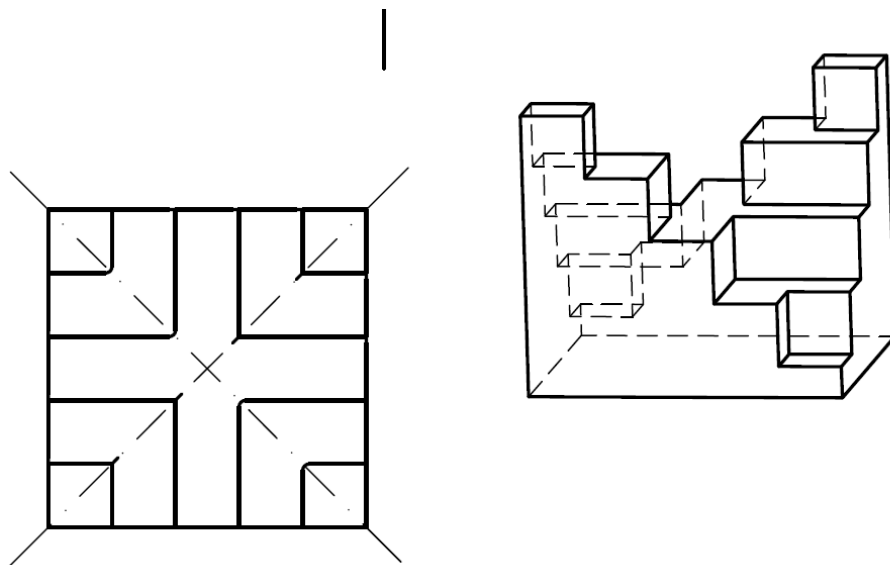
6 Vytvoření modelových dat

Funkce `sestaveni_modelu6` z úhlových odchylek a ideálních matic bodů sestavuje dráhu nástroje, která odpovídá formátem měřenému způsobu.

```
function [ Brx_m,Bry_m,Brz_m ] = sestaveni_modelu6(uhelxy, uhelzy, uhelyx,  
uhelzx, uhelxz, uhelyz, BXi,BZi, BYi )  
%% sestaveni rotacnich matic  
R2r=[1,-xy,0;0,1,0;0,zy,1];  
R12=[1,0,0;yx,0,0;-zx,0,0];  
R5r=[0,0,xz;0,0,yz;0,0,1];  
%% model- pohyb stolu Brx  
a=1;  
Brx_m=zeros(41*17*10,3);  
for y=1:17  
    for x=1:41  
        for i=1:10  
s=R2r*R12*[BXi(x,1)+BXi(x,6);0;0]+R2r*[0;BYi(y,2)+BYi(y,6);0];  
Brx_m(a,:)=s';  
a=a+1;  
        end  
    end  
end  
%% model- pohyb stolu Bry  
a=1;  
Bry_m=zeros(41*17*10,3);  
for x=1:41  
    for y=1:17  
        for i=1:10  
s=R2r*R12*[BXi(x,1)+BXi(x,6);0;0]+R2r*[0;BYi(y,2)+BYi(y,6);0];  
Bry_m(a,:)=s';  
a=a+1;  
        end  
    end  
end  
%% model- pohyb vretene  
a=1;  
Brz_m=zeros(17*10,3);  
for z=1:17  
    for i=1:10  
v=R5r*[0;0;BZi(z,3)+BZi(z,6)];  
Brz_m(a,:)=v';  
a=a+1;  
    end  
end  
end  
end
```

7 Vyhodnocení virtuálního obrobku

Funkce z kapitoly 5.3 je příliš dlouhá na umístění v tištěné verzi a je součástí pouze elektronické přílohy.

**Příloha B Návrh zkušebního obrobku**

DOKONČOVACÍ PODMÍNKY

ŘEZNÁ RYCHLOST: 100 až 160 m/min

ÚBĚR NA ZUB: 0,05 mm

HLOUBKA ZÁBĚRU: 0,5 mm

Struktura povrchu:		Hrany: <div><div><div></div><div></div><div></div></div><div><div></div><div></div><div></div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div> <div><div></div><div></div><div></div></div>
--------------------	--	---

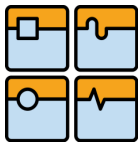
**Seznam obrázků**

Obr. 2.1: Tři translační a tři rotační chyby při pohybu v lineární ose (2)	8
Obr. 2.2: Tři translační a tři rotační chyby při pohybu v rotační ose (2)	9
Obr. 2.3: Vzájemné odchylky mezi osami (2)	9
Obr. 2.4: Schéma laserinterferometru (4)	11
Obr. 2.5: Chyba mrtvé dráhy (4)	12
Obr. 2.6: Kosinová chyba (4)	12
Obr. 2.7: Abbeho chyba (4)	12
Obr. 2.8: Interferometrické měření přímosti (4)	13
Obr. 2.9: Interferometrické měření přímosti pomocí úhlů (4)	13
Obr. 2.10: Měření kolmosti dvou pohybových os laserinterferometrem (2)	14
Obr. 2.11: Laser tracker společnosti API (5)	14
Obr. 2.12: Schéma laser trackeru (2)	14
Obr. 2.13: Princip reflektoru při sledování trackerem (2)	15
Obr. 2.14: Připevnění reflektoru ve vřetení a laser tracker (7)	16
Obr. 2.15: Plán měření pro kompenzaci chyb (7)	17
Obr. 2.16: Polohové vektory (7)	17
Obr. 2.17: Příklady nevhodně zvolených regresních funkcí (9)	18
Obr. 3.1: Požadavky na postup zjišťování vlastností stroje (2)	19
Obr. 3.2: Tříosé vertikální obráběcí centrum MCFV 2080 (12)	20
Obr. 3.3: Souřadný systém stroje	20
Obr. 3.4: Pevný třízrcátkový reflektor	21
Obr. 3.5: Motorizovaný reflektor Active Target	21
Obr. 3.6: Připevnění reflektoru ke stroji	21
Obr. 3.7: Vytvoření roviny souřadného systému	22
Obr. 3.8: Natočení souřadného systému	22
Obr. 3.9: Mapa odchylek pracovního prostoru obráběcího stroje	23
Obr. 3.10: Princip vzniku prostorové sítě bodů	24
Obr. 3.11: Standardní zkušební cyklus (11)	25
Obr. 3.12: Cyklus se zpětným krokem (11)	25
Obr. 3.13: Cyklus s kyvadlovým krokem (2)	25
Obr. 3.14: Princip najíždění do poloh u stolu	25
Obr. 3.15: Princip najíždění do poloh osy z	26
Obr. 3.16: Vyznačený pohyb přímo na stroji	26
Obr. 3.17: Plán měření	26
Obr. 3.18: Najíždění v ose x	27
Obr. 3.19: Najíždění v ose y	27
Obr. 3.20: Najíždění stolu ve směru x	28
Obr. 3.21: Najíždění stolu ve směru y	28
Obr. 3.22: Najíždění v ose z	28
Obr. 3.23: Geometrické chyby upínání obrobku (2)	28
Obr. 3.24: Rozmístění měřených bodů	29
Obr. 3.25: Dráha stolu v umělých datech	30
Obr. 3.26: Vývojový diagram pro generátor odchylek	31
Obr. 4.1: Plán vyhodnocení výsledků	33
Obr. 4.2: Normální rozdělení (10)	34
Obr. 4.3: Vypočtené parametry přesnosti osy x při nastavení y=0	36
Obr. 4.4: Vypočtené parametry přesnosti osy x pro všechna nastavení y	37
Obr. 4.5: Tři složky chyby stolu a křížových saní	38
Obr. 4.6: Tři složky chyby vřeteníku	38
Obr. 4.7: Translační pohyb jednoho tělesa (3)	39
Obr. 4.8: Souřadné systémy jednotlivých těles stroje	40
Obr. 4.9: Schéma uspořádání souřadných systémů pro křížové saně a stůl	41

Obr. 4.10: Schéma souřadného systému vřetene.....	41
Obr. 4.11: Úhlová odchylka vedení křížových saní promítnutá do rovin XY a ZY.....	42
Obr. 4.12: Originální data z pohybu stolu.....	43
Obr. 4.13: Data z modelu dráhy stolu	43
Obr. 4.14: Porovnání modelu s daty měření vřetene	44
Obr. 4.15: „Skutečný“ tvar desky.....	44
Obr. 4.16: Aproximace rovinou	44
Obr. 4.17: Normálový vektor roviny a jeho úhly	45
Obr. 5.1: Chyby skutečné plochy obrobku (13).....	48
Obr. 5.2: Schéma postupu vytvoření virtuálního obrobku	49
Obr. 5.3: Podobnost s měřením (najíždění x, nastavování y)	50
Obr. 5.4: Podobnost s měřením (najíždění y, nastavování x)	50
Obr. 5.5: Rozměry virtuálního obrobku a jeho poloha na stole	50
Obr. 5.6: Příklad 1, kdy není shodný poloměr nástroje s roztečí sítě	51
Obr. 5.7: Příklad 2, kdy dráha nástroje nekopíruje body sítě.....	51
Obr. 5.8: Rozměry obrobku a umístění v souřadném systému stroje	52
Obr. 5.9: Body 3D sítě odpovídající dráze nástroje při obrábění ploch obrobku.....	53
Obr. 5.10: Mezní a střední rozměry plochy ZX1 (max, mean, min)	53
Obr. 5.11: Tolerance rovinnosti.....	53
Obr. 5.12: Proložená plocha k určení rovinnosti	54
Obr. 5.13: Stanovení rovinnosti z rozdílu reziduí	54
Obr. 5.15: Určení rovnoběžnosti bodů jedné ploch (modře) vůči vztažné rovině (červeně) ..	55
Obr. 5.14: Tolerance rovnoběžnosti.....	55
Obr. 5.17: K vysvětlení hodnocení tolerance kolmosti	56
Obr. 5.16: Toleranční prostor kolmosti.....	56
Obr. 5.18: Rozměry zkušební obrobku dle normy (10)	60
Obr. 5.19: Rozměry upínacího přípravku dle normy (10).....	60
Obr. 6.1: Vysvětlení číslování k tabulce	70

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Srovnání přesnosti laser trackerů na trhu (5)	15
Tabulka 3.1: Vybrané parametry stroje	20
Tabulka 3.2: Hodnoty z měření rovinnosti.....	29
Tabulka 4.1: Systematické a náhodné chyby.....	34
Tabulka 4.2: Ukázka z tabulky s parametry přesnosti polohování pro osu x	37
Tabulka 5.1: Příklady geometrických tolerancí tvaru, směru a polohy.....	49
Tabulka 5.2: Výsledky předchozí kapitoly pro vygenerovaná data	58
Tabulka 5.3: Výsledky předchozí kapitoly pro data z modelu	58
Tabulka 5.4: Rozměrové tolerance virtuálního obrobku.....	59
Tabulka 5.5: Řezné podmínky při zkouškách (10)	60
Tabulka 6.1: Možné konfigurace os horizontálních center (16)	62
Tabulka 6.2: Možné konfigurace os vertikálních center (16).....	63



Seznam citací

1. MEHRABI, M.G.; O'NEAL, G. *Improving machining accuracy in precision line boring*. Netherland : Kluwer Academic Publishers, 2002.
2. Weck, Manfred. *Werkzeugmaschinen 5: Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. 6. bearbeitete Aufl. Berlin : Springer Verlag, 2002.
3. Demeč, Peter. *Presnosť obrábacích strojov a jej matematické modelovanie*. Košice : Viena Košice, 2001.
4. ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění*. Praha : Český normalizační institut, 1998.
5. Automated Precision Inc. [Online]. [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.apisensor.com/tracker3-usa>>.
6. Renishaw [Online]. [cit. 2011-03-05.]. Dostupné z WWW: <<http://www.renishaw.com> >.
7. Maxhame, Dave. *The Practical Approach to Volumetric Error Compensation. Quality Digest* [Online], 2010-02-22. [cit. 2011-05-03.]. Dostupné z WWW: <<http://www.qualitydigest.com/inside/cmssc-article/practical-approach-volumetric-error-compensation.html>>.
8. Karpíšek, Zdeněk. *Regresní analýza* [Online]. 2006. [cit. 2011-03-26.]. Dostupné z WWW: <<http://mathonline.fme.vutbr.cz>>.
9. User's Guide [Online]. Mathworks, 2010. [cit: 2011-03-26.]. Dostupné z WWW: <<http://www.mathworks.com/help/>>.
10. VDI/DGQ 3441. *Statische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen*. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 1977.
11. ČSN ISO 230-2. *Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 2: Stanovení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslíkové řízených osách*. Praha : Český normalizační institut, 1998.
12. Tajmac-ZPS [Online]. 2011-04-07. [cit. 2011-05-02.]. Dostupné z WWW: <<http://www.tajmac-zps.cz/>>.
13. AMRICHOVÁ, H. *Matematické modelovanie presnosti obrábacích strojov*. Košice : Technická univerzita v Košiciach, 2008.
14. DUTSCHKE, Wolfgang. *Fertigungsmesstechnik*. Stuttgart : B.G. Teubner, 1993.
15. VDI 3443. *Statische Prüfung der Arbeitsgenauigkeit von Fräsmaschinen*. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 1997.
16. Weck, Manfred. *Werkzeugmaschinen 4: Maschinenarten, Bauformen und Anwendungsbereiche*. Berlin : Springer-Verlag, 2002.